



TITLE:

鉄道車両の滑走防止を目的とした
増粘着材噴射・検出システムの開
発(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

具嶋, 和也

CITATION:

具嶋, 和也. 鉄道車両の滑走防止を目的とした増粘着材噴射・検出システムの開発. 京都大学, 2013, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2013-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k17605>

RIGHT:

鉄道車両の滑走防止を目的とした
増粘着材噴射・検出システムの開発

2013 年

具嶋和也

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 粉体技術	3
1.2.1 粉体工学	3
1.2.2 粉体の空気輸送	4
1.2.3 混相流	4
1.2.4 流量計測	5
1.2.4.1 流量	5
1.2.4.2 流量計	5
1.2.5 増粘着材噴射装置	6
1.3 静電気式粉体流量センサーの設計	7
1.3.1 静電気と粒子帯電	7
1.3.2 粉体の帯電現象と機構	8
1.3.2.1 接触帯電	8
1.3.2.2 摩擦帯電	9
1.3.2.3 衝突帯電	9
1.3.3 固気二相流帯電	9
1.3.4 固気二相流帯電における測定法	10
1.3.5 信頼性・耐久性	10
1.3.5.1 振動性能	10
1.3.5.2 摩耗性能	10
1.3.6 粉体流量センサー	11
1.4 増粘着材噴射検出システム	12
1.5 本博士論文の構成	13
参考文献	14

第 2 章 静電気式粉体流量センサーの粉体粒子の質量流量測定	19
2.1 緒言	19
2.2 センサーの原理および構造	20
2.3 実験装置および試験方法	21
2.3.1 実験装置	21
2.3.2 供試体	22
2.3.3 輸送管	23
2.3.4 試験方法	23
2.3.5 試験条件	24
2.4 センサーによる増粘着材噴射検出特性	25
2.4.1 輸送管の材質が検出電圧に与える影響	25
2.4.2 検出管内の形状が検出電圧に与える影響	27
2.4.3 インタラプトスティックの本数と検出電圧の関係	29
2.4.4 粉体粒子の流量がインタラプトスティック付き検出管の検出電 圧に与える影響	29
2.4.5 検出管の材質が検出電圧に与える影響	31
2.4.6 粉体流量と検出電圧の関係	33
2.5 結言	33
記号	34
参考文献	35
第 3 章 ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの振動特性評価	38
3.1 緒言	38
3.2 実験装置および試験方法	39
3.2.1 実験装置	39
3.2.2 振動条件下での噴射検出特性	40
3.2.3 固有振動での噴射検出特性	41
3.2.4 耐振動特性	42
3.2.5 試験条件	42
3.3 振動が検出電圧に与える影響	44
3.3.1 加速度振幅と粉体流量の影響	44

3.3.2	加振周波数の影響	46
3.4	固有振動が検出電圧に与える影響	49
3.4.1	固有振動数解析	49
3.4.2	固有振動数の影響	51
3.4.3	振動耐久性	53
3.5	結言	53
	参考文献	54
第 4 章	ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの耐久性・信頼性評価	57
4.1	緒言	57
4.2	実験装置および試験方法	58
4.2.1	実験装置	58
4.2.2	増粘着材噴射装置	59
4.2.3	噴射出力制御装置	59
4.2.4	静電気式粉体流量センサー	60
4.2.5	試験方法	61
4.3	摩耗量の影響	63
4.3.1	検出管の摩耗量測定	63
4.3.2	アイソレータの摩耗量測定	64
4.4	円筒管の表面形状変化による影響	65
4.4.1	検出管の表面観察	65
4.4.2	検出管の表面粗さ測定	66
4.4.3	アイソレータの表面観察	69
4.4.4	アイソレータの表面粗さ測定	70
4.5	センサーの噴射検出性能評価	72
4.5.1	インタラプトスティックの摩耗による影響	72
4.5.2	長期使用における影響	74
4.6	結言	76
	参考文献	77
第 5 章	静電気式粉体流量センサーの鉄道車両への適用	80

5.1	緒言	80
5.2	実験装置および試験方法	81
5.2.1	実験装置	81
5.2.2	試験方法	83
5.3	実車両でのセンサーの噴射検出性能評価	84
5.3.1	走行試験による増粘着材の噴射測定	85
5.3.2	振動の電圧波形への影響	87
5.3.3	停車車両および走行車両における増粘着材噴射の比較	89
5.4	振動解析	90
5.5	結言	91
	参考文献	92
第 6 章	滑走検知・制御システムによる滑走防止効果の検証	94
6.1	緒言	94
6.2	滑走検知・制御システムの概要	95
6.3	滑走検知ユニット	97
6.3.1	滑走検知法	97
6.3.2	滑走検知ユニットの構成	98
6.4	滑走制御ユニット	99
6.4.1	滑走制御ユニットの構成	99
6.4.2	噴射状態検出装置	99
6.5	鉄道車両での噴射検出機能と滑走防止効果の検証	100
6.5.1	特急形車両での測定結果	100
6.5.2	近郊形車両での測定結果	103
6.5.3	複数回発生した滑走の検知	106
6.6	結言	107
	記号	107
	参考文献	108
第 7 章	結論	111
7.1	本研究で得られた結果	111

7.2	今後の課題	115
7.3	他分野への適用	115
謝辞		116
研究業績		118

第 1 章

緒論

1.1 研究の背景と目的

鉄道車両では、降雨や降雪による湿潤条件下において車輪とレールの間の粘着力が低下するため、車輪の滑走 (Wheel-Slide) が起こり、ブレーキ距離が延伸する。その対策として、車輪に加えるブレーキ力の強さを制御することで滑走を防止する滑走検知再粘着装置 (Anti-Lock Braking System; ABS) を採用している¹⁾。特に、高速走行する新幹線電車の車輪とレールの間の粘着力は、レール上の水膜の影響を大きく受けるため、車両速度が上昇するのに伴い低下する²⁾。そのため、このような車両では適切な粘着力に合ったブレーキ力の制御を行わなければならない。減速時には、粘着力以上のブレーキ力の負荷が原因で滑走が発生し、車輪踏面にフラットと呼ばれる平らな傷や剥離、またレール頭頂部に損傷が発生する場合がある。このように車輪やレールが損傷すると、車両の運行において遅延や運休を招いたり、乗り心地を悪化させる要因となる³⁾。さらに、損傷した車輪やレールを元の状態に戻すためには研削作業やそれに伴う費用がその都度必要となる。そのため、滑走は鉄道において解決しなければならない大きな課題の一つと言える。近年、滑走のメカニズムを解明するため、シミュレーションによる研究が進められている^{4), 5)}。

これまで、鉄道車両用のブレーキ技術に関しては、営業車の列車運行の円滑化による観点から滑走防止技術の開発⁶⁾や、車輪とレールの長寿命化あるいはメンテナンスの省力化を目的とするフラット防止技術の開発⁷⁾などが進められている。また、ブレーキ停止距離の短縮や滑走回数の低減を目指した、技術開発が日々行われている⁸⁾。しかしながら、鉄道車両の滑走に関するこうした問題を、今日においても完全に解決するまでには至っていない。

現在、ABS は滑走防止のために鉄道車両で広く普及しており、在来線電車の通勤車両や近郊車両、また高速で走行する新幹線電車などにも使用されている。一

般的に、製造年数が比較的新しい車両には ABS が標準装備として搭載されている車両が多く、形式が古い旧型車両では ABS が搭載されていない場合が多い。

ABS を搭載していない車両では、ABS を搭載している車両に比べて滑走回数が多く、車輪の損傷数も比較的多くなることが知られている。このことから考えると、単純に ABS を搭載していない車両に ABS を追加装備すれば、滑走を防止することができるはずである。しかし、このような車両に ABS を追加装備する場合、多くの車両が旧式であるため耐用年数が短く ABS の購入コストが高いことから、車両の運行に伴う費用耐効果を考えると ABS を追加装備することは難しい。ABS は、回転する車輪のブレーキ力を制御することにより、車輪の滑走を防止する装置である。ABS の他には、増粘着材 (セラミックス粒子) を利用することにより、車輪とレールの間の粘着力を制御する増粘着材噴射装置 (Ceramic-Particle Jetting Device) がある⁹⁾。この増粘着材噴射装置は、増粘着材を車輪とレールの間に高速で噴射することにより、車輪とレールの間の粘着力を向上させて滑走防止を行うものである。

東海道・山陽区間を走行する 500 系、700 系新幹線電車あるいは東北区間を走行する新幹線「はやぶさ」には、降雨や降雪などの湿潤時において非常ブレーキを掛けた場合に滑走が発生してブレーキ距離が延伸することを防止するために、ABS と併用して増粘着材噴射装置が搭載されている。このように ABS と増粘着材噴射装置を組み合わせ併用することを含め、これまで増粘着材噴射装置は滑走防止に対して高い実績を有している。増粘着材噴射装置を搭載した在来線の車両では、運転士が滑走を検知してから手動で増粘着材を噴射する車両の割合が多く、滑走防止のタイミングを失することもあった。さらに、増粘着材噴射装置から増粘着材が噴射されるときに噴射状態を検出する装置がこれまでなく、装置を作動させていても、実際に噴射が実行されているかどうかを確認する手段がなかった。高速で走行する新幹線電車では、現在のところ噴射を検出する装置が装備されてなくても問題なく営業運転を行っているが、提言した噴射を検出する装置があれば、噴射が実行されなかった場合でもバックアップシステムに制御を移行することができるため、走行安全性が向上する。

前述のように ABS を装備していない旧型車両には、ABS とは違う滑走防止機能を備えた装置が必要である。そのため本研究では、滑走検知ならびに増粘着材噴射装置の機能を持ち合わせ、さらに増粘着材の噴射状態を監視することができるシステムを提案すると共に、そのような機能を有した実用的な装置を開発することを本研究の目的とした。

1.2 粉体技術

本節では、粉体工学 (Powder Technology) および粉体の空気輸送、混相流、粉体の計測技術 (Measuring Technique) の紹介、さらに粉体技術を応用することにより開発した増粘着材噴射装置について概説する。

1.2.1 粉体工学

粉体は、自然を取り巻く様々な現象と深く関わっており、古代から我々の暮らしと密接に関係している。化学工業などの工学の様々な分野においても粉体は重要な役割を果たしている。粉体として扱われる主な物質としては、食品の小麦粉や塩、砂糖、デンプン、化粧品、医薬品 (顆粒・粉薬等)、砂、セメント、ガラスビーズ、セラミックス、研磨材、磁性体、磁気材料、火薬、顔料、塗料などが挙げられる。

近年では、最先端技術のバイオテクノロジーに代表される遺伝子研究やナノテクノロジー、あるいは半導体などのメカトロニクス技術、電子写真に代表される粒子の運動や挙動の制御、気相系粒子の生成制御、帯電量分布の計測、粒子流量計測、さらに人間が摂取する食品や医薬品などの分野にまで粉体技術が応用されている。

多数の粉体粒子が集合したときの物理的特性や測定方法、あるいは操作方法などを扱う工学の分野を粉体工学と呼んでいる。粒子の直径が小さな物を粉、大きな物を粒として区別することがあり、扱う対象によっては粉粒体工学、微粒子工学と呼ばれることもある。

粉体工学では、このような粉体の特性や測定方法などを総合的に研究すると共に粉体に携わるあらゆるジャンルの産業を支える横断的な学問としてこれまで発展を遂げている。例えば、穀物や石油などを輸送しているパイプラインに見られるような輸送プロセスも粉体工学では取り扱われている。また、鉄道で使用されている砂撒き装置の砂や増粘着材噴射装置のセラミックス粒子の輸送プロセスもまた、パイプラインと同様の輸送プロセスによるものである。こうした粉体工学に基づいた技術や知識は、輸送プロセスを効率良く稼働させることや、新しい製品の開発あるいはそれらを取り扱う設備の設計には不可欠なものである。

1.2.2 粉体の空気輸送

粉体の空気輸送 (Pneumatic Transportation) は、空気を動力源として粉体を輸送する方法で装置が単純な構造であることが特徴である。粉体をベルトコンベアにより輸送する場合、ベルトを回転させるので非常に大きなエネルギーを必要とし、騒音や振動が比較的大きくなる。一方、空気輸送は輸送管の中に粉体を投入し、それを空気により輸送する装置である。そのため、輸送管の中を空気と粉体が流れる音や振動のことを考慮すれば良く、発生する音や振動はベルトコンベアなどに比べると小さい。

空気輸送の方法を分類すると、低濃度高速輸送 (High-Speed Transportation of Low Concentration) と高濃度低速輸送 (Low-Speed Transportation of High Concentration) の 2 種類に分けられる。低濃度高速輸送は輸送管内の粉体の濃度が低く、輸送管内の粉体の速度が比較的高速である。一方、高濃度低速輸送は輸送管内の粉体の濃度が高く、輸送管内の粉体の速度が比較的低速である。低濃度高速輸送は、少量の粉体を大量の空気で押し出すことにより輸送するものである。鉄道車両に用いられる増粘着材噴射装置の場合には、粉体流量が 0.5 g/s で内径 $\phi 10 \text{ mm}$ の管路内を流れることから、低濃度高速輸送に分類することができる。

1.2.3 混相流

固体、液体、気体の 3 つの相の中で、2 つ以上の相が混在する流れのことを混相流 (Multi-Phase Flow) と呼んでいる^{10), 11)}。例えば、水に泡が含まれているものや、粉体が風により飛ばされている状態がそれに相当する。また、空気輸送プロセスにおけるパイプライン内の流れは、管路内に固体や気体あるいは液体がそれぞれ単独で存在する場合もあるが、それぞれの相が混在する混相流の場合もある。一般的に、粉体粒子を貯蔵するホッパーやシュートのように粉体粒子が単独で流動することを粉体一相流、空気や水などの媒体中を粉体粒子が浮遊して流動することを固気二相流 (Gas-Solid Pipe Flow) または固液二相流 (Gas-Liquid Pipe Flow) と呼んでいる^{12), 13)}。固気二相流の管路を用いて粉体粒子を空気輸送するプロセスでは、規定量の粉体が管路内を定常的に流れ続けなければならない。そのため、プロセスの動作状況を監視すると共に粉体流量の変化を制御する技術が必要である。

1.2.4 流量計測

1.2.4.1 流量

流体を取り扱う場合に最も必要とされる情報は流れの量，すなわち流量である．身近なところでは，水道やガスの使用量の計測，ガソリンや灯油あるいは飲料水の計量などが挙げられる．産業界においては，流量計測は非常に重要な技術として欠かせないものである¹⁴⁾．

管路における流量計測では，測定量として体積流量 (Volumetric Flow Rate)，質量流量 (Mass Flow Rate)，積算体積流量 (Integrating Volumetric Flow Rate) が利用されており，これらの流量を計測する機器を流量計と呼んでいる．体積流量と質量流量は単位時間あたりに管路を流れる流体の体積および質量をそれぞれ表わしており，接頭語に積算の文字が付いたものは流量計の指示値に関して過去のある時点から現在までの間にその管路を流れた流体の量を表したものである．

1.2.4.2 流量計

流体の質量流量計測を行う場合には，流体の種類他に流速や濃度などの諸条件を考慮した上で，その都度計測に適した流量計を選択する必要がある^{15), 16)}．一般的に，ある特定の機種種の流量計を一種類だけ用いることにより，様々な条件の粉体の流量を測定することができる万能な計測機器は存在しない．固気二相流または固液二相流の流量計測には数多くの計測方法があり，固気二相流においては差圧や静電容量，電磁誘導，超音波，光透過の他に粒子帯電 (Particle Charging) による発生電流を利用する静電気測定法などを用いて測定が行われている．固気二相流の計測に用いられる主な方法について，計測方法や原理あるいは特徴を以下で説明する．

- 1) 差圧式流量計 (Differential Pressure Flowmeter) は，絞り流量計とも呼ばれ，管路の途中に絞りを設けることにより，絞りの前後に生じる圧力差から固気混合比や粉体流量，空気流量の計測を行う^{17), 18), 19)}．構造が単純で安価なので様々な流体の測定に有効である．しかし，固形物を含む液体の測定には適していない．
- 2) 静電容量式流量計 (Capacitance Flowmeter) は，粉体などの絶縁物や半導体が対向した 2 枚の金属平板の間を通過するときに静電容量が変化することを利用するもので，粉体流量の計測を行う^{20), 21)}．

- 3) 電磁流量計 (Magnetic Flowmeter) は、ファラデーの電磁誘導の法則を利用するもので、導電性の液体が電界中を流れたときに発生する起電力から流速および流量の計測を行う^{22), 23), 24)}。構造が簡単で種類が豊富であるため工業分野で広く利用されている。気体や非導電性の液体の測定には不向きで、高温流体の測定には困難を要する。
- 4) 超音波流量計 (Ultrasonic Flowmeter) は、管路内を流れる液体や気体に対して超音波を利用するもので、発信した超音波信号と透過信号あるいは反射信号から流量の計測を行う^{25), 26), 27)}。圧力損失がなく、出力は流速に比例する。配管の種類や状況により測定が不可能となる。
- 5) 光透過法 (Optical Transmission Method) は、管路内に光を放つ発光装置と受光装置を設け、光が発光装置から受光装置に進むときに粉体粒子によって遮蔽されるときに減衰する光の強度から流量の計測を行う^{28), 29), 30)}。粉体の種類や湿度による変化が試験結果に影響を及ぼすことがある。粉体が発光部や受光部に付着すると精度が著しく低下する。
- 6) 静電気測定法 (Electrostatic Measuring Method) は、粉体粒子の静電気による摩擦帯電現象を用いる方法^{31), 32), 33)}で、管路内を流れる粉体粒子が管壁と衝突するとき粒子が帯電することを利用して、粒子帯電による発生電流から粉体流量の計測を行う。利点としてメンテナンス作業の低減化を挙げられるが、一方で環境や運用条件の変化が測定結果に大きな影響を及ぼす可能性がある。

1.2.5 増粘着材噴射装置

鉄道車両の加速や減速は、車輪とレールの間の粘着力に依存するため、粘着特性に基づいてブレーキ力を制御することが極めて重要である。1800 年代後半に英国の Galton が粘着力の問題について論じている³⁴⁾。

鉄道車両の粘着力の問題を解決するために、これまで電気式や機械式など様々な種類のブレーキ装置が考案され、開発が行われてきた。ブレーキ装置の開発の長い歴史において、その装置の性能は目覚ましい発展を遂げてきた。しかしながら、今日でも湿潤条件下においてはブレーキ性能の根源となる粘着力を完全に制御することは難しい。こうした鉄道車両における車輪の粘着に関する問題を解決する手段として、1990 年代の初期に日本の鉄道総合技術研究所において降雨や降雪時の粘着力確保を目的とする増粘着材噴射装置が開発された³⁵⁾。

増粘着材噴射装置の動作や原理について以下に説明する。湿潤条件下において

鉄道車両が時速 300 km の高速で走行した場合を考えると、レール面上の水膜厚さは $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度である。車両走行時において、車輪とレールの接触部分に粒径約 $300\text{ }\mu\text{m}$ のアルミナ粒子が増粘着材噴射装置から噴射されると、水膜を破り車輪とレールの間でアルミナ粒子が踏み砕かれて粒径約 $10\text{ }\mu\text{m}$ の大きさになる。アルミナ粒子が噴射されて車輪とレールの間で踏みつぶされると、車輪とレールの間にアルミナ粒子が食い込んで、車輪とレールの表面は十点平均粗さ (Ten Point Height of Irregularities: R_z) 表記で $7\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ となる。水膜を破る効果が発生するため車輪とレールの間の粘着力を増加させる。このように増粘着材噴射装置の粘着力が増加する (増粘着) 効果により、高速域での車両の車輪とレールの間の粘着力を確保することが可能となる。

1.3 静電気式粉体流量センサーの設計

1.3.1 静電気と粒子帯電

紀元前 600 年頃にギリシャの哲学者 Thales が、天然磁石の磁気的な性質についての研究を行っている。彼は、硬くて茶黄色をした樹脂の化石である琥珀 (Amber) に興味を持ち、摩擦した琥珀による摩擦帯電で羽毛が引き寄せられる力学現象を発見した。歴史上では、この Thales が世界で最初に静電気の実験を行った人物とされている。

16 世紀には、英国の W. Gilbert が磁力や電気の研究を行っている。そして静電現象 (Electrostatic Phenomena) についての理論的な考察や実験による検証が行われた。彼は、自身で考案した検電器により琥珀のほか種々の物質に同様な引き寄せる力が現れることを見出した。そして、彼はこれらの物質を総称してギリシャ語で琥珀を意味する *Elcetrica* と名付けた³⁶⁾。今日、体系的に静電気を捉える研究を行ったことから、Gilbert は静電気の創始者と呼ばれている。

更に、20 世紀には電気集塵の原型が考案され、電気集塵装置が実用化されている。現在、産業界では高度な粒子操作技術の開発や、先端技術への応用が図られており、静電気や静電気力を利用した製品の開発が活発に行われている。既に、社会や産業界の必需品として地位を確立したものから、次世代の製品として位置づけられるものまで様々である。粒子帯電の応用が産業と直結する例として、電子写真、静電粉体塗装などが挙げられる。静電気は、物体表面への電荷の保持に関係するので、物体を小さくするほど比表面積は大きくなり、その影響は強く現れる。

微粒子の帯電機構の解明は、応用技術を発展させる上で重要な課題であり、電子やイオンの移動、物質固有の性質、外部電界の影響など、関係する因子が多く、実験、理論検討、シミュレーションなど多面的なアプローチが必要となる。また、粉体の粒子帯電だけではなく、除電の技術の開発も行われている。

粉体粒子がどれだけ帯電するかを示す帯電量は電荷密度 σ で表され、単位表面積当たりの電荷 (C/mm^2) が定義である。粉体の帯電量は、直接測定することが難しい。そのため、帯電した粒子の電位や電界を測定することにより、帯電量が求められる³⁷⁾。

一般的に粉体の帯電量の計測には、帯電体を二重の導体の箱で包み込むことで帯電量を測定するファラデー・ケージ (Faraday Cage) あるいはファラデー・シールド (Faraday Shield) が用られることが多い^{38), 39)}。この原理は、英国の M. Faraday が発見したもので、彼は金属製の外壁に大きな放電を加えても、部屋の中には何の力も働かないことを実証した。導体である金属に囲まれた部屋の内部には電気力線が侵入できないため、外部の電場が遮られ、内部の電位は全て等しくなる。逆に、内部に電荷を持ち込むと、電荷はファラデー・ケージの表面に分布しようとするため、ファラデー・ケージの側に移動する。この原理を用いることにより、ファラデーケージで正確な粉体粒子の帯電量を計測することができる。

1.3.2 粉体の帯電現象と機構

粉体が静電気により帯電する現象を発生する機構で区分すると、接触、摩擦、衝突の 3 種類に分類することができる。

1.3.2.1 接触帯電

接触帯電は、異なった物体間で起こる普遍的現象として知られている⁴⁰⁾。粉体を緩やかに混合したり、あるいは単に容器内に入れるだけでもこの現象が起こるが、代表的な絶縁物である高分子材料では、接触帯電は接触界面での電子移動によるものであることが Bauser や Lowel らにより報告されている。

接触帯電の典型的なものは、一方の物体が既に帯電しているときに、接触している二つの物体間における電子の転移である。

1.3.2.2 摩擦帯電

摩擦帯電は、一般に単なる接触による帯電よりも発生電荷量が多くなる。これは多くの場合、摩擦によって電荷発生に有効な接触面積が増大するためである。

摩擦帯電について 1779 年に A. Volta は、接触の結果として生じるもので摩擦は単に接触点の増加をもたらすのみであると述べている。さらに、1879 年に H. L. F. Helmholtz が 2 物体が接触したのち分離したとき得られる電荷は、接触しているとき表面を挟んで存在する電気二重層 (Electric Double Layer) の電荷でなければならない。この二重層の厚さは分子の大きさ、電位差は金属の接触電位差の程度である。二重層が物体と共に分離されるとき、両表面間の間隔が増大し、静電容量が減少する結果、二重層の電荷は高い電位を示し、帯電として観測されると述べている。

1.3.2.3 衝突帯電

衝突帯電は、固体表面に粉体が衝突するときの帯電である。この帯電は、接触時間が極めて短い接触帯電と考えることができる。

衝突帯電で発生する電荷の面密度は、接触時間の長い接触帯電の電荷密度とまったく変わらないことが知られている。これは、電荷が接触するとほとんど瞬間的に移動することを証明する結果でもある。また、衝突時の接触面積は衝突速度と共に増大するが、その変化は衝突部分の変形が弾性領域か塑性領域かによって異なることが知られている。

1.3.3 固気二相流帯電

粉体が輸送管内を輸送されるとき帯電を流送帯電という。このような輸送には空気が用いられることが多く、固気二相流帯電とも呼ばれている。

固気二相流帯電に関する研究は、これまで多くの研究者により試みられており、種々の研究結果が報告されている^{41), 42)}。研究の目的には、主に以下の 2 つの項目に別けることができる。一つ目は、送流時に発生する帯電粉体による静電気障害防止の面から、固気二相流帯電現象を解析することを目的とする研究である。二つ目は、粉体の流れの中に電極を挿入するか、あるいは流送路 (パイプ) の一部を他の部分と電氣的に絶縁し、これらの部分とアースとの間で発生する電流と粉体の流量の関係を明らかにし、電流値の変化から粉体の輸送状態についての情報

を得ることを目的とする研究で、B. N. Cole ら⁴³⁾により行われている。測定対象となる粉体の種類は、無機物から有機物まで広範囲に及んでいる。

1.3.4 固気二相流帯電における測定法

前節において輸送管を通過してきた粉体の帯電現象に対して、輸送管の絶縁された部分と粉体粒子の衝突によって発生した帯電量を電流として取り出すことにより、粉体の輸送状態を測定する方法を述べた。この測定方法においては、粉体の流量や流速の変化などと発生した電流との相関関係、あるいは発生電流が粉体流量の増加と共に直線的に増加する研究結果が報告されている⁴⁴⁾。また、輸送管内に挿入した電極に発生する電流と粉体の輸送状態の関係に関しても、同様の結果が得られている。さらに、測定部の材質および形状と発生電流の関係なども研究されている。

1.3.5 信頼性・耐久性

1.3.5.1 振動性能

鉄道車両に使用される装置は、車両による振動を常に受けることになる。そのため、振動の影響を受けても装置に問題がないことを検証する必要がある。鉄道車両で使用される車両用部品は、振動の影響による装置の破損、あるいは破損による装置の不動作や装置の落下を防止する観点から、振動に関して日本規格協会 (Japan Standards Association; JIS) の E 4031:鉄道車両部品-振動試験方法⁴⁵⁾や E 4023:鉄道車両の振動特性-測定法⁴⁶⁾、あるいは国際標準化機構 (International Organization For Standardization; ISO) などの基準を満たすように品質管理・品質保証システムが定義されている。そのため、基準に適合するかを検証することが義務付けられている。

1.3.5.2 摩耗性能

粉体流量を計測するセンサーは、管路内を粉体が空気により流れる固気二相流で使用する。そのため、使用時には粉体が管路内で衝突を繰り返すことにより、管壁が摩耗することが考えられる。

摩耗には発生する原因によって、凝着摩耗 (Adhesive Wear)、アブレシブ摩耗

(Abrasive Wear), 腐食摩耗 (Corrosive Wear), 疲れ摩耗 (Fatigue Wear) の 4 つの種類に分類することができる^{47), 48)}.

上記では摩耗の種類について述べたが, 管路内を空気により粉体粒子が流れる固気二相流を取り扱う場合にはアブレシブ摩耗を考える必要がある. アブレシブ摩耗は, 粉体の材質や管路内を流れるときの流量あるいは流速などの諸条件により摩耗の進行状況が異なる. 摩耗の進行が早い場合には, 管路内壁が粉体粒子により削られて管壁に穴が開いて装置として使用をできなくなる恐れがある. そのため, 粉体流量を測定するセンサーの使用においてはアブレシブ摩耗による影響を検証しなければならない.

1.3.6 粉体流量センサー

1.2.4.2 節において, 差圧や静電容量などの複数の測定法が固気二相流の流量計測に有効であることを述べた. その中で管路内を流れる粉体粒子の濃度が低い条件の場合には, 粉体粒子の帯電現象を用いる静電気測定法が有効である^{49), 50)}.

増粘着材噴射装置では増粘着材の噴射が行われる場合, 管路内を流れる粉体粒子の濃度は 0.5 g/s と低い. このことから, 粉体流量を計測するセンサーには粒子帯電を用いた静電気測定法 (静電気式粉体流量センサー) を用いることにした.

1.4 増粘着材噴射検出システム

増粘着材噴射検出システムは、増粘着材噴射装置と滑走検知装置、噴射検出装置の 3 種類の装置で構成されている。システムの構成要素であるこれらの装置について概説する。

増粘着材噴射装置は、噴射タンクと噴射ノズルおよびそれらを繋ぐ鋼管やゴムホース、噴射用の電磁弁で構成されている。増粘着材の噴射は、この電磁弁に噴射指令を送ることで実行される。滑走検知装置は、走行車両において車両に既設の速度発電機の速度信号から速度差と減速度をそれぞれ算出し、それらを用いて車両の滑走検知を行う。さらに、滑走検知と同時に増粘着材噴射を実行するために電磁弁へ噴射指令を送信する。噴射検出装置は、静電気式粉体流量センサーにより増粘着材噴射装置から噴射されたアルミナ粒子の噴射状態をモニタリングし、規定量の噴射が行われているかどうかについて判定を行う。上記の装置から構成されている本システムは、走行車両の滑走を検知すると共に増粘着材を噴射し、さらに増粘着材噴射が実行されたかを判定する。

増粘着材噴射検出システムは、鉄道車両が高速域で走行するときの安全性・信頼性をこれまでよりも更に向上させるために必要なシステムである。本研究では、増粘着材噴射の実行を判定するまでの内容であるが、噴射の判定結果をバックアップシステムにフィードバックすれば、噴射が行われなかった場合にも適応可能となる。

これまでに本システムのような提案を行った事例はなく、全く新しいシステムであり、本システムが開発され利用することができれば高速車両において有効と考えられる。設計したシステムは車両に搭載して使用されるため、使用環境が苛酷である。特に、増粘着材噴射を検出するセンサー部は、年間を通して屋外に曝され、車両走行中に発生する振動の影響を大いに受けることになる。このような環境で本システムが使用されることから、開発において特に増粘着材噴射を検出するセンサー部については、用いる手法を良く吟味する必要があると共に信頼性や耐久性についても十分な検証がなされなければならない。

1.5 本博士論文の構成

本論文で扱う内容は、増粘着材 (セラミックス粒子) を噴射する増粘着材噴射装置の噴射状態をモニタリングすることができる静電気式粉体流量センサーの開発 (第 2 章) とベンチ試験によるセンサーの性能評価, 耐久性・信頼性評価 (第 3・4 章), 実車試験によるセンサーの性能評価, 滑走検知制御システムの開発 (第 5・6 章) に大別される。

粉体流量が少なく, さらに粒子速度が速い条件では, 静電容量や電磁誘導などの測定方法を用いても増粘着材噴射の検出は難しい。第 2 章では, このような条件において粉体流量の測定が有効な静電気測定法に着目し, 増粘着材噴射装置の噴射状態を検出することができる静電気式粉体流量センサーを開発した。この測定法では, 粒子が流れる管の材質の種類によりセンサーの感度が影響を受けるため, それについて検証した。また, センサーの感度が低い材質の管を使用した場合でも噴射流量を測定できるようにした手法についても検証した。

増粘着材噴射装置は振動を伴う鉄道車両に搭載して使用されることから, 振動による影響をセンサーも受ける。第 3 章では, 振動条件下でのセンサーの検出感度について述べる。ベンチ試験により, 加振機を用いて振動数や加速度などの条件を変えてセンサーの加振試験を行い, 振動条件下でのセンサーの噴射検出性能の評価を行った。さらに, センサーが固有振動数で振動したときのセンサーの噴射検出性能への影響についても検証した。

増粘着材の粒子はセンサーを構成する円筒形状の検出管やアイソレータ, あるいは検出管内部へ感度向上の目的で組み込まれている棒状の突起物に繰り返し衝突することから, これらの構成部品が摩耗することによりセンサーの性能が低下することが考えられる。第 4 章では, センサーの耐久性・信頼性を評価した結果を述べる。ベンチ試験による増粘着材噴射を繰り返す耐久性試験を実施し, 円筒管およびアイレータの摩耗量, 摩耗面の観察および粗さ測定を行うと共に円筒管内部の金属棒の摩耗によるセンサーの噴射検出性能の影響を検証した。

センサーは鉄道車両に搭載して使用されるため, 振動の影響を受ける車両走行時においても増粘着材の噴射が確実に検出できることが求められる。第 5 章では, 走行する実車両においてセンサーが増粘着材の噴射を検出できることを確認した。さらに, ベンチ試験による振動試験の結果とも比較し, 検討した。本センサーは, 高速で走行する新幹線電車などでの使用を目指しており, 増粘着材噴射装置のモニタリングシステムの一部として活用することを想定している。

第 6 章では, 増粘着材噴射装置を用いて自動で滑走を検知し, 鉄道車両の滑走

防止を行う滑走検知・制御システムを提案する。また、システムには増粘着材の噴射をモニタリングするシステムも組み込まれている。本システムの滑走防止効果を検証するために、ABS を装備していない実車両にシステムを搭載して湿潤状態でブレーキ試験を行い、滑走防止に対する有効性を検証した結果を述べる。

最後に、7 章では、本博士論文のまとめであり、本研究の成果を整理するとともに今後の課題を示す。

参考文献

- 1) Choi, J. J., S. H. Park and J. S. Kim; "Dynamic adhesion model and adaptive sliding mode brake control system for the railway rolling stocks," *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. EMechE.*, **221**, 313-320 (2007)
- 2) Baek, K., K., Kyogoku, T., Nakahara; "An Experimental Study of Transient Traction Characteristics between Rail and Wheel under Low Slip and Low Speed Conditions," *Wear*, **265**, 1417-1424 (2008)
- 3) Kumagai, N., I. Hasegawa, K. Kawaguchi, H. Nakamura and K. Nagase; "Mechanisms of Wheel Flat Occurrence," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **57**, 2011-2016 (1991)
- 4) Handoko, Y. and M. Dhanasekar; "Wheelset skid in railway bogies," *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. IMechE*, **221**, 237-245 (2007)
- 5) Mei, T. X., J. H. Yu and D. A. Wilson; "A Mechatronic Approach for Effective Wheel Slip Control in Railway Traction," *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. EMechE.*, **223**, 295-304 (2009)
- 6) 内田清五, 新幹線のブレーキシステム, 第 1 版, pp.24-31, レールアンドテック出版 (2001)
- 7) Sackfield, A., D. Dini and D. A. Hills; "Contact of a rotating wheel with a flat," *International Journal of Solids and Structures*, **44**, 3304-3316 (2007)
- 8) 新井浩, 菅野悟, 柳瀬直仁; "新幹線高速化のブレーキシステムについて,"

- JR EAST Technical Review*, **22**, 11-14 (2010)
- 9) 大野薫, 伴巧, 具嶋和也, 大江晋太郎, 本多康祐; "増粘着材噴射の車輪滑走・フラット防止への適用," *Railway Research Review*, **59**, 4, 10-13 (2002)
 - 10) Snoek, C. W.; "A Selection of New Developments in Multiphase Flow Measurement Techniques," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **3**, 60-73 (1990)
 - 11) Williams, R. A., C. G. Xie, F. J. Dikin, S. J. R. Simons and M. S. Beck; "Multi-Phase Flow Measurements in Powder Processing," *Powder Technology*, **66**, 203-224 (1991)
 - 12) Ahmed, W. H. and B. I. Ismail, Innovative Techniques For Two-Phase Flow Measurements, Recent Patens on Electrical Engineering, Bentham Science Publishers Ltd., **1**, pp. 1-13 (2008)
 - 13) Masuda, H., K. Higashitani and H. Yoshida, Powder Technology Handbook, 3rd ed., pp. 795-803, CRC Press, Japan (2006)
 - 14) 小川胖, 流れわざのシルクロード【流量計測の歴史】, 第1版, pp. 63-85, 日本工業出版 (2006)
 - 15) Colver, G. M., Instrumentation for Fluid-Particle Flow, 1st ed., pp. 47-111, William Andrew Publishing / Noyes (1999)
 - 16) Furness, R. A.; "The Principles of Flowmeter," *Flow Measurement and Instrumentation*, **2**, 233-242 (1991)
 - 17) Molerus, O.; "Prediction of Pressure Drop with Steady State Pneumatic Conveying of Solids in Horizontal Pipes," *Chemical Engineering Science*, **36**, 1977-1981 (1981)
 - 18) Laouar, S. and Y. Molodtsof; "Experimental Characterization of the Pressure Drop in Dense Phase Pneumatic Transport at Very Low Velocity," *Powder Technology*, **95**, 165-173 (1998)
 - 19) Zhang, H. J., S. J. Lu and G. Z. Yu; "An Investigation of Two-Phase Flow Measurement with Orifices for Low-Quality Mixtures," *International Journal of Multiphase Flow*, **18**, 149-155 (1992)
 - 20) Xie, C. G., A. L. Stott, S. M. Huang, A. Plaskowski and M. S. Beck; "Mass-Flow Measurement of Solids Using Electrodynamic and Capacitance Transducers," *J. Phys. E: Sci.*, **22**, 712-719 (1989)

- 21) Yan, Y. and A. R. Reed; "Experimental Evaluation of Capacitance Transducers for Volumetric Concentration Measurement of Particulate Solids," *Flow Measurement and Instrumentation*, **10**, 45-49 (1999)
- 22) Sheen, S. H., H. T. Chein and A. C. P. Paptis, Instrumentation for Fluid-Particle Flow, 1st ed., pp. 212-251, William Andrew Publishing / Noyes (1999)
- 23) Bernier, R. N. and C. E. Brennen; "Use of the Electromagnetic Flowmeter in a Two-Phase Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, **9**, No. 3, 251-257 (1982)
- 24) Cha, J. E., Y. C. Ahn, K. W. Seo, H. Y. Nam, J. H. Choi and M. H. Kim; "An Experimental Study on the Characteristics of Electromagnetic Flowmeters in the Liquid Metal Two-Phase Flow," *Flow Measurement and Instrumentation*, **14**, 201-209 (2003)
- 25) Greenwood, M. S., J. R. Skorpik, J. A. Bamberger and R. V. Harris; "On-Line Ultrasonic Density Sensor for Process Control of Liquids and Slurries," *Ultrasonics*, **37**, 159-171 (1999)
- 26) Lee, D. W., H. C. No and C. H. Song; "Measurement of Two-Phase Mixture Level Using an Ultrasonic Method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **29**, 609-614 (2005)
- 27) Jacobson, S. A., P. N. Denbigh and D. E. H. Naude; "A New Method for the Demodulation of Ultrasonic Signals for Cross-Correlation Flowmeters," *Ultrasonics*, 128-132 (1985)
- 28) 東レリサーチセンター, 21 世紀のセンサ計測技術, 第 1 版, pp. 103-112, TRC R&D LIBRARY, (2001)
- 29) Hong, J. and Y. Tomita; "Measurement of Distribution of Solids Concentration on High Density Gas-Solids Flow Using an Optical-Fiber Probe System," *Powder Technology*, **83**, 85-91 (1995)
- 30) Lemoine, F., M. Wolff and M. Lebouché; "Experimental Investigation of Mass Transfer in a Grid-Generated Turbulent Flow Using Combined Optical Methods," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**, 3255-3266 (1997)

- 31) Kuczynski, R., A. Prezekwas and W. Kucinski; "The Static Electrification of Particles in Gas-Solids Pipe Flow," *Journal of Electrostatics*, **10**, 309-319 (1981)
- 32) Masuda, H., S. Matsusaka, S. Akiba and H. Shimomura; "Electrification of Fine Particles on Gas-Solids Pipe Flow," *the Society of Powder Technology*, **34**, 91-96 (1997)
- 33) Matsusaka, S. and H. Masuda; "Simultaneous Measurement of Mass Flow Rate and Charge-To-Mass Ratio of Particles in Gas-Solids Pipe Flow," *Chemical Engineering Science*, **61**, 2254-2261 (2006)
- 34) 大山忠夫, 粘着の話 車輪とレール間の粘着力とその有効利用, 第 1 版, pp.8-10, レールアンドテック出版 (2002)
- 35) Ohno, K., T. Ban, T. Obara and K. Kawaguchi; "Adhesion Improvement with Jetting Ceramics Particles in High Speed Running," *Quarterly Report of RTRI*, **35**, 4, 218-220 (1994)
- 36) 高分子学会, 静電気ハンドブック, 第 1 版, pp. 45, 高分子学会編 (2010)
- 37) 竹内学; "粉体の帯電に関する因子," 静電気学会誌, **19**, 1, 2-7 (1995)
- 38) 葛西昭成; "帯電性の測定技術 - 第 I 講 帯電量の計測 -, " 静電気学会誌, **10**, 1, 62-70 (1986)
- 39) 飯島歩; "粉体 - 第 II 講 強制帯電とその電荷測定法 -, " 静電気学会誌, **12**, 2, 141-144 (1988)
- 40) 松井満; "静電気についての基礎実験 - 第 I 講 静電きを作る -, " 静電気学会誌, **18**, 2, 147-154 (1994)
- 41) Matsusaka, S. and H. Masuda; "A New Method for Measurement of Powder Flow Rate Based on Static-Electrification," *TE MICROMERITICS (Funsai)*, **39**, 92-99 (1995)
- 42) Secker, P. E.; "Instrumentation for Electrostatic Measurements," *Journal of Electrostatics*, **16**, 1-19 (1984)
- 43) Cole, B. N., M. R. Baum and F. R. Mobbs; "Fluid Mechanics & Measurement in Two-Phase Flow System," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, **184**, 3C77 (1969-70)
- 44) 松坂修二; "管内固気二相流における粒子帯電とその応用," 静電気学会誌, **23**, 61-67 (1999)

-
- 45) 日本規格協会, JIS E4031-1994 「鉄道車両部品-振動試験方法」, pp. 1-5, 日本規格協会 (1994)
 - 46) 日本規格協会, JIS ハンドブック ㊟ 鉄道, 第 1 版, pp. 1033-1036, 日本規格協会 (2010)
 - 47) Buckly, D. H., Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication, 1st ed., pp. 469-484, Elsevier. Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands (1978)
 - 48) Horst Czichos, Tribology a systems approach, Tribology series 1, ed.by Elsevier, Netherland, pp.113-119 (1978)
 - 49) Gajewski, J. B.; "Measuring Probes, Head, and System for the Non-contact, Electrostatic Measurements of the Two-Phase Flow Parameters in Pneumatic Transport of Solids," *Journal of Electrostatics*, **32**, 297-303 (1994)
 - 50) The Association of Powder Process Industry and Engineering Japan, FunRyuTai Keisoku Handbook, ed.by APPIE, pp.401-403, Nikkan (1981)

第 2 章

静電気式粉体流量センサーの粉体粒子の 質量流量測定

2.1 緒言

鉄道車両の空転防止やブレーキ時の滑走防止に適用されている増粘着材噴射装置は粉体であるセラミックス粒子を空気で噴射させており，使用時の粉体流量は 0.5 g/s である．従来の流量計測では粉体流量 5.0 g/s 程度が限界とされており^{1), 2)}，粉体流量が非常に少ないことから同装置での流量測定は難しい．この増粘着材噴射装置において，粉体粒子の流量超過や低下などを検知できるモニタリングシステムがあれば，粉体流量を制御できるため無駄なく効率的に粉体粒子を使用することが可能となる．さらに粉体粒子が正常に噴射されていることを確認する手段としての利用が可能である．サンドブラスト装置や粉体輸送装置において，管路内を粉体粒子が空気と共に混合された状態で流れることを固気二相流と言う．このような場合，差圧，静電容量，電磁誘導，超音波，マイクロ波，相関あるいは静電気などの原理^{3), 4), 5), 6), 7)}を用いて粉体の流量測定を行うのが一般的である⁸⁾．

しかし，輸送管の管路内を流れる粉体粒子の流量が少なく，粒子速度が速い条件では，粉体粒子の流量を定量的^{9), 10)}に測定することは難しい^{11), 12), 13), 14)}．これまで，粉体粒子が内径 $\phi 10$ mm の鋼管内を流量 2.0～5.0 g/s で流れる条件では，粉体粒子の流量の定量測定は可能であったが，流量が 0.2～1.0 g/s になると，既往の測定装置では測定が不可能であった^{15), 16), 17)}．これらのことを解決する有効な手段として，静電気の原理による計測法を用いた^{18), 19), 20), 21)}．

そこで，本研究では上記に示された定量測定が不可能な条件下において，静電気を利用した計測法を使用して輸送管内を空気搬送される粉体粒子の流量測定を行い定量測定の可能性を検証した．

2.2 センサーの原理および構造

管内固気二相流では、粉体粒子が管壁（金属）と衝突を繰り返しながら移動し、衝突する度に粒子と管壁の間で電荷の移動を生じる．この電荷移動は接触物質間の有効電位差 V に支配されており、このときの電位差 V は、仕事関数に基づく接触電位差 V_c から、電気影像効果 V_e 、および空間電荷効果 V_b を差し引いたものである．すなわち、次式で表される^{22), 23), 24)}．

$$V = V_c - V_e - V_b \quad (2.1)$$

一般に、 V_e と V_b は粒子の電荷 q に比例すると仮定できる．1 回の衝突によって移動する電荷は次式で表される．

$$\frac{dq_c}{dn} = k \frac{\varepsilon_0 S V}{z_0} \quad (2.2)$$

ここで、 q_c は接触によって粒子に蓄えられた電荷、 n は粒子と管内壁面との衝突回数である． k は帯電効率、 ε_0 は空気の誘電率、 S は粒子と内壁の有効接触面積、 z_0 は接触表面間距離である．帯電した粒子の電荷は、時間と共に減衰する．単位時間あたりの減衰量がその時点での粒子の持つ電荷 q に比例すると仮定すれば次式が成り立つ．

$$\frac{dq_r}{dn} = -\frac{k_r}{f} q \quad (2.3)$$

q_r は緩和電荷、 k_r は定数、 f は単位時間あたりの粒子と壁の衝突回数である．粒子に蓄えられる総電荷量は式 (2.2), (2.3) の和で表されるので次式になる．

$$\frac{dq}{dn} = \frac{dq_c}{dn} + \frac{dq_r}{dn} \quad (2.4)$$

式 (2.4) を q について解くと、粒子が管壁と衝突した際の帯電量と衝突回数 n の関係を表す次式が得られる．

$$q = q_0 \exp \left(-\frac{n}{n_0} \right) + q_\infty \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{n}{n_0} \right) \right\} \quad (2.5)$$

q_0 は粒子の初期電荷, q_∞ は粒子の飽和電荷, n_0 は粒子の電荷が飽和電荷の 63 % に達するまでの衝突回数 (緩和衝突回数と呼ぶ) を表す.

次に, 多数の粒子が管内を通過するときの帯電現象について考える. 管内固気二相流の配管の一部 (長さ Δx) を電氣的に独立させて接地 (アース) すると, その区間で粒子から管壁に移動した単位時間あたりの電荷を電流として検出することができる. このときの電流すなわち発生電流 I は, 式 (2.5) から解析的に導くことができる.

$$\frac{I}{W_p} = a \left(\frac{q}{m_p} \right)_0 + b \quad (2.6)$$

ここで, W_p は管内通過粒子の質量流量, m_p は粒子の質量, $(q/m_p)_0$ は $x=0$ で単位質量あたりの電荷である. a, b は管内の流速が一定であるとき定数となり, 初期電荷が変化しなければ, 発生電流 I は粉体粒子の流量 W_p に比例する.

2.3 実験装置および試験方法

2.3.1 実験装置

Fig. 2.1 に, 実験に使用した装置の概略を示す. 装置は, コンプレッサー, 電磁弁, 増粘着材噴射タンク (Cerajet tank) と輸送管 (Transport pipe) および噴射ノズル (Nozzle) からなる増粘着材噴射装置 (Ceramic-particle jetting device), 電流計測装置である静電気式粉体流量センサー (Static electricity sensor) および I-V 変換アンプ (Amplifier), 計測制御用 PC²⁵⁾ およびデータレコーダ (Data recorder) で構成されている.

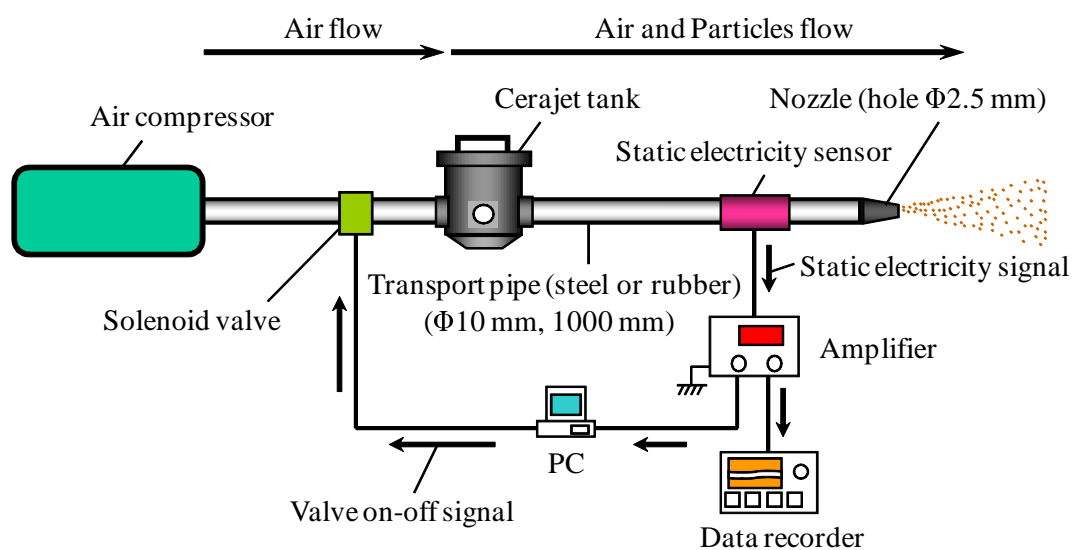


Fig. 2.1 Experimental apparatus

Fig. 2.2 に、静電気式粉体流量センサー（三協パイオテク（株）製，ES-1）および検出管の概略を示す．センサーはステンレス製の円筒状の外管と内管からなり，内管（以下，検出管と呼ぶ）は外部とセラミックス製のアイソレータで電氣的に絶縁されている．この検出管は I-V 変換アンプの＋極，外管は－極と接続されている．

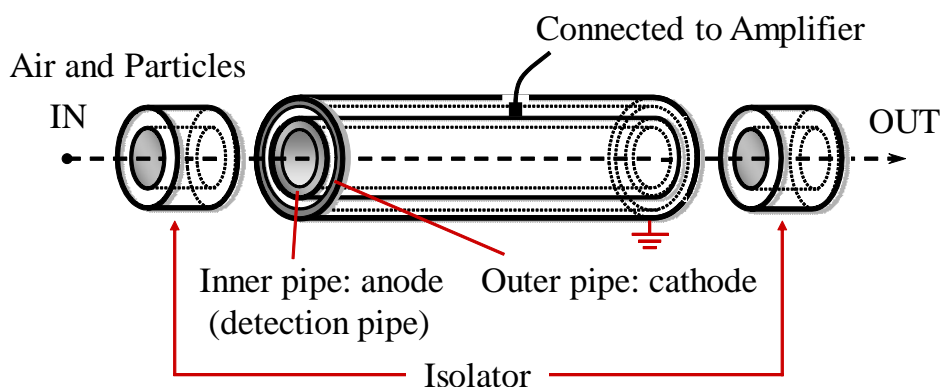


Fig. 2.2 Sensor and detection pipe

2.3.2 供試体

検出管は，ステンレス（SUS304）製および真鍮製で円筒形状（内径 $\phi 10$ mm）のもの，および検出する発生電流の感度を上げるために検出管の内壁の形状を変え

たものを用いた。内壁の形状を変えたものとしては、鉄製の金属棒（以下、インタラプトスティックと呼ぶ）を 1 本、4 本、8 本（4 本、8 本はらせん状）取り付けした。インタラプトスティックを 4 本あるいは 8 本取り付けした検出管は、軸方向に垂直にインタラプトスティックが取り付けられており、さらにそれぞれのインタラプトスティックは等間隔で円周方向に 45° ずつずらしている。検出管を軸方向から見ると内部にインタラプトスティックがらせん状に取り付けてあるのが見える。Fig. 2.3 に円筒形状の検出管の概略を示す。

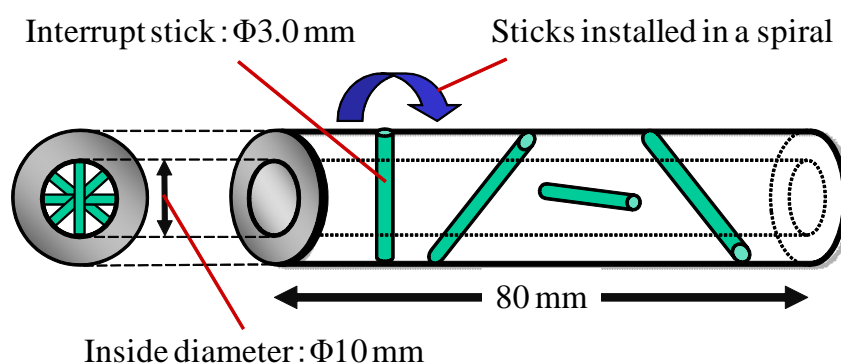


Fig. 2.3 Detection pipe

2.3.3 輸送管

輸送管に関しては、使用する条件としない条件でそれぞれ試験を行った。使用する場合は、鋼管あるいは高圧用合成ゴムホース（(株)ブリヂストン製、O.K.EXCEL）を用いた。以下、高圧用合成ゴムホースはホースと呼ぶ。

2.3.4 試験方法

粉体粒子は、計測制御用 PC（以下、PC と呼ぶ）によって電磁弁を開くことにより、噴射される。電磁弁が開くと、コンプレッサーで作られた圧縮空気は増粘着材噴射タンク（以下、セラジェットタンクと呼ぶ）内に流れ込み、タンク内の粉体粒子と空気の流量が調整されて固気二相流となり、輸送管、静電気式粉体流量センサー（以下、センサーと呼ぶ）および噴射ノズルまで到達し、ノズル先端部の直径 $\phi 2.5 \text{ mm}$ の穴から噴射される。空気搬送により輸送管内を流れてきた粉体粒子は、管壁と繰り返し衝突することにより静電気が発生し帯電する。このときセラジェットタンクと輸送管の途中に取り付けたセンサー（検出管）には、帯電した

粉体粒子とは逆極性の電荷が発生する．この検出された電荷 (微小電流) を I-V 変換アンプで増幅し，さらに電圧に変換する．変換したモニター用の電圧 (以下，検出電圧と呼ぶ) を接続した PC およびデータレコーダ (日置電機 (株) 製, 8825) に出力し測定した．

2.3.5 試験条件

増粘着材 (粉体粒子) には質量中位径が 0.3 mm のアルミナを，またセラジェットタンクにはタンク内の有効容積が 1.0 l の T10 型タンクを使用する．輸送管内の空気流量は約 240 l/min，空気圧力はゲージ圧で 0.7 MPa，噴射時間は 30 s，粉体流量は約 0.3 g/s, 0.5 g/s, 0.7 g/s, I-V 変換アンプは測定範囲を $\pm 1.0 \times 10^{-9}$ A，電流-電圧変換比を $\pm 1.0 \times 10^9$ V/A とした．すなわち，発生電流が $\pm 1.0 \times 10^{-9}$ A のとき対応する検出電圧は ± 1.0 V となる．試験時の温・湿度は，それぞれ 25～32 °C，49～78 % で行った．試験条件を Table 2.1 に示す．

Table 2.1 Experimental conditions

Detection pipe	SUS304, Brass
Isolator	Ceramics
Air flow rate [l/min]	240
Particle flow rate [g/s]	0.3, 0.5, 0.7
Transport pipe	Rubber hose, Vinyle hose, Steel pipe
Number of interruptsticks [—]	0, 1, 2, 4, 8
Jetting time [s]	30
Jetting particle	Alumina ϕ 0.3 mm
I-V charge rate [V/A]	$\pm 1.0 \times 10^9$
Temperature [°C]	25～32
Humidity [%]	49～78

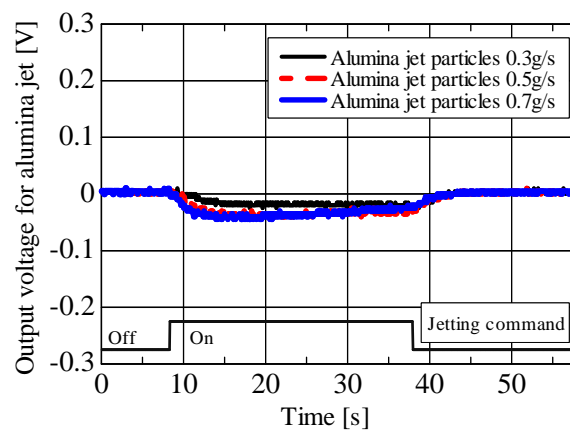
2.4 センサーによる増粘着材噴射検出特性

2.4.1 輸送管の材質が検出電圧に与える影響

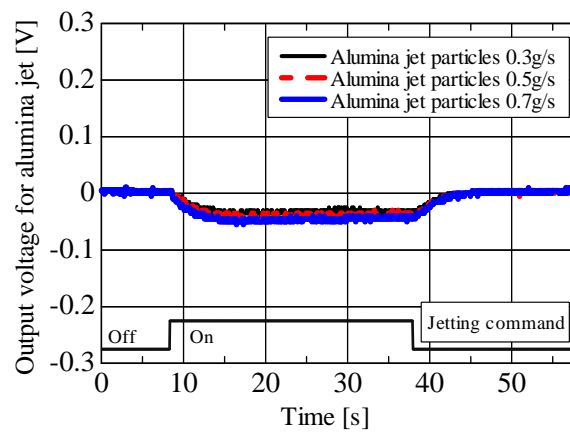
Fig. 2.4 に、粉体粒子を 3 段階の流量で噴射したときに、センサー（ステンレス製の検出管：インタラプトスティック無し）で測定された検出電圧の測定結果を示す。図中の Jetting command は電磁弁開閉の信号である。

Fig. 2.4 (a) は輸送管を使用しない場合であり、Fig. 2.4 (b) は輸送管として 1m の鋼管を使用した場合での測定結果である。Fig. 2.4 (a) と Fig. 2.4 (b) のどちらも検出電圧は数 10 mV 程度で、粉体流量と検出電圧との間には、相関関係が認められなかった。また、Fig. 2.4 (a) と Fig. 2.4 (b) とともに検出電圧はマイナスの極性を示した。

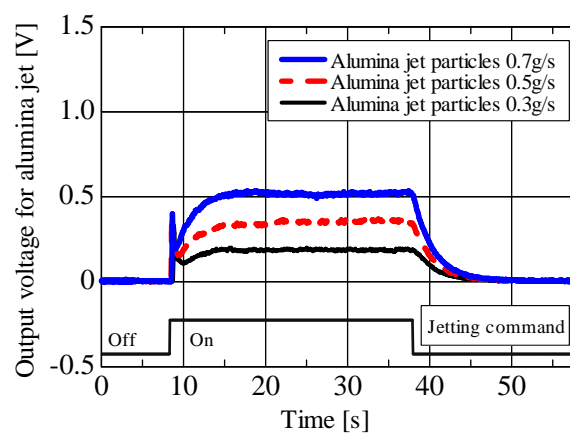
Fig. 2.4 (c) は輸送管に 1 m のホースを使用した場合での測定結果である。検出電圧は、粉体流量が増加すると、増加した。また、検出電圧はプラスの極性を示した。これはホースが接続されていると、空気により搬送されている粉体粒子がホース内壁と衝突し、静電気が発生して帯電するためである。このときホースで発生した電荷はマイナスの極性を示し、粉体粒子はプラスの極性に帯電した。初期電荷の効果により検出管はプラスに帯電した粉体粒子の電荷を検出したため、プラスの極性を示したと考えられる。この結果から、ホースを使用した条件で粉体粒子を噴射した場合、粉体流量の変化を検出できることが明らかになった。



(a) Jet test with no transport pipe



(b) Jet test with a steel pipe



(c) Jet test with a rubber hose

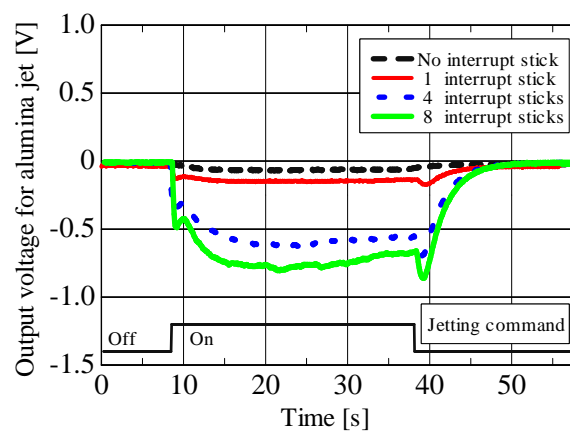
Fig. 2.4 Jet test with different transport pipes

2.4.2 検出管内の形状が検出電圧に与える影響

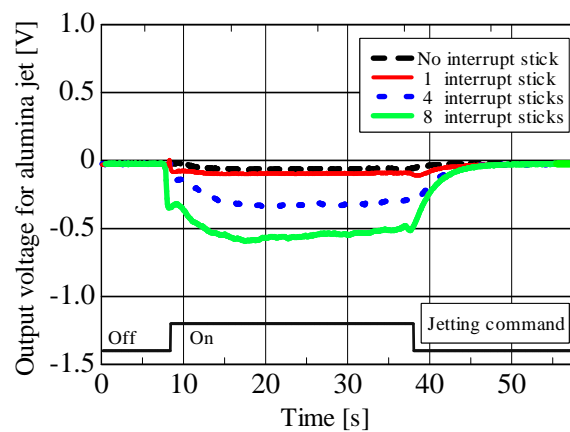
Fig. 2.5 に、ステンレス製の検出管の内壁の形状が異なる供試体について、測定した結果を示す。Fig. 2.5 (a) は輸送管を使用しない場合、Fig. 2.5 (b) は輸送管に 1m の鋼管を使用した場合での測定結果である。Fig. 2.5 (a) と Fig. 2.5 (b) のどちらも検出管の内壁にインタラプトスティック無し、および 1 本取り付けられた供試体では、検出電圧は数 10 mV 程度の値を示した。一方、インタラプトスティックを 4 本あるいは 8 本取り付けられた供試体では、検出電圧は約 300 mV～700 mV の値を示した。インタラプトスティックの本数が増えると、検出電圧も大きくなっている。これは、粉体粒子が検出管を通過するとき、検出管に取り付けたインタラプトスティックと衝突し、さらに衝突した粉体粒子が管壁に衝突することにより、粉体粒子が検出管に衝突する回数が増加し、検出電圧が増加したためと考えられる。

Fig. 2.5 (c) は、輸送管にゴムホースを使用したものである。極性は逆転しているものの、Fig. 2.5 (a) および (b) と同様に、インタラプトスティックの数が 4 本あるいは 8 本の検出管の方が、0 本あるいは 1 本の検出管に比べて検出電圧が増加した。

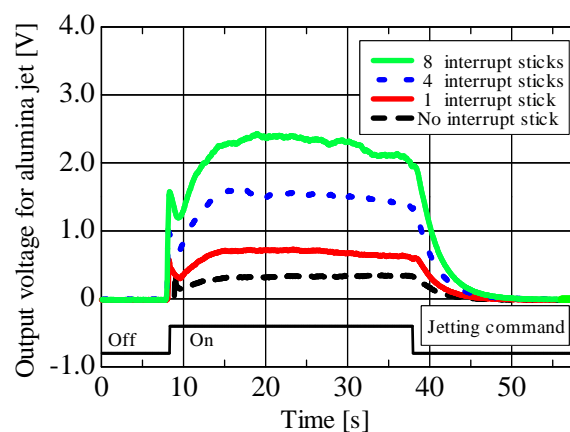
測定した電圧波形の極性が Fig. 2.5 (a), (b), (c) で異なる理由は、アルミナ粒子が衝突する輸送管の材質が異なることにより、アルミナ粒子と輸送管の間の電荷の移動する方向性が変わったことに起因するものと考えられる。異種物質が接触した場合、その電荷移動の序列を求めたものを帯電列と言う。この帯電列の序列で考えると、アルミナ粒子は鋼管に比べて正に帯電する傾向にあり、ゴムに対してアルミナ粒子は負に帯電する帯電列の位置にあることを示している。



(a) Jet test with no transport pipe



(b) Jet test with a steel pipe



(c) Jet test with a rubber hose

Fig. 2.5 Jet test with different inner shapes of pipe
(Alumina jet particles : 0.5 g/s)

2.4.3 インタラプトスティックの本数と検出電圧の関係

Fig. 2.6 に、ステンレス製の検出管内にインタラプトスティックをそれぞれ 0, 1, 4, 8 本取り付け付けた供試体において、粉体粒子を噴射したときの測定結果を示す。測定した検出電圧の結果は絶対値とした。Fig. 2.6 より、輸送管を使用しない場合、あるいは輸送管を使用した場合のどちらにおいても、検出管内に取り付けたインタラプトスティックの本数が増加すると、検出電圧の絶対値は増加することが明らかになった。

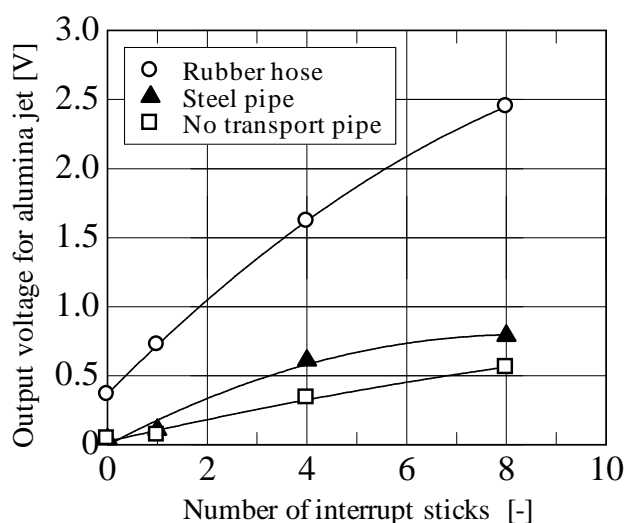
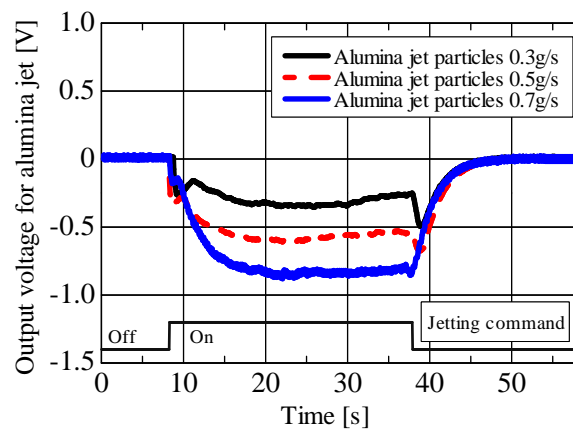


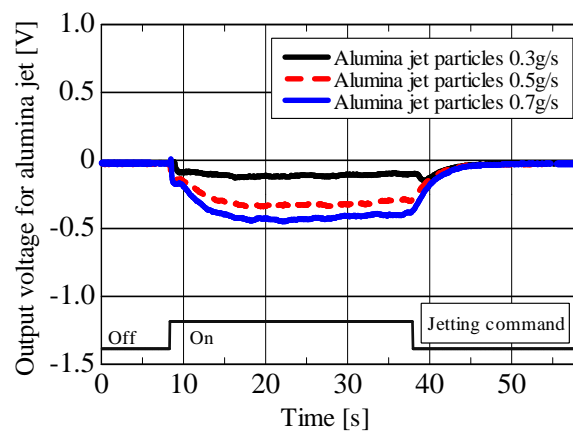
Fig. 2.6 Correlation between the number of interrupt sticks and absolute value of output voltage (Alumina jet particles : 0.5 g/s)

2.4.4 粉体粒子の流量がインタラプトスティック付き検出管の検出電圧に与える影響

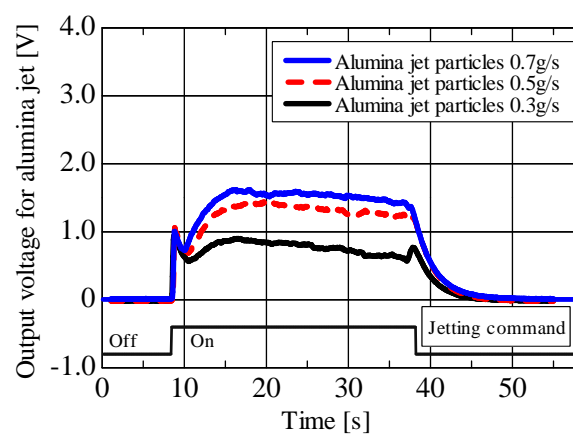
Fig. 2.7 に、センサー（ステンレス製の検出管：インタラプトスティック 4 本を取り付け）において、粉体粒子を 3 段階の流量で噴射したときの測定結果を示す。Fig. 2.7 (a), (b) および (c) のどの結果においても粉体流量が増加すると、検出電圧も増加した。また、この方式による静電気測定では、粉体流量が 0.2~0.7 g/s までの流量変化を検出可能で、静電容量測定で検出可能な粉体流量 2.0~5.0 g/s よりも一桁小さいオーダーの流量変化を検出できた。



(a) Jet test with no transport pipe



(b) Jet test with a steel pipe



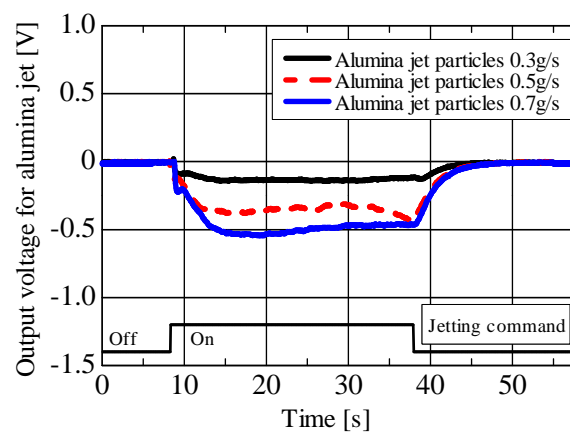
(c) Jet test with a rubber hose

Fig. 2.7 Jet test with a SUS304 pipe (4 interrupt sticks)

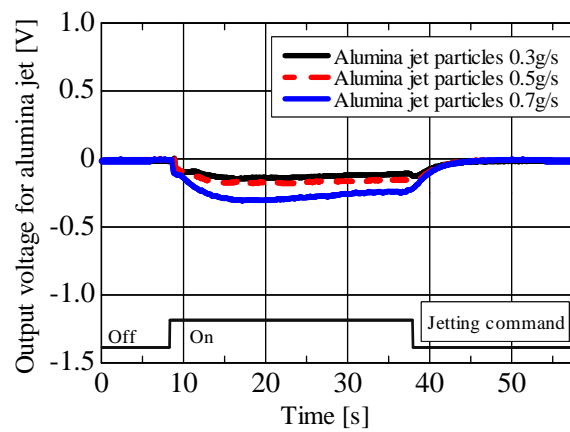
2.4.5 検出管の材質が検出電圧に与える影響

Fig. 2.8 に、センサー（真鍮製の検出管：鉄製のインタラプトスティック 4 本取り付け）において、粉体粒子を 3 段階の流量で噴射したときの測定結果を示す。

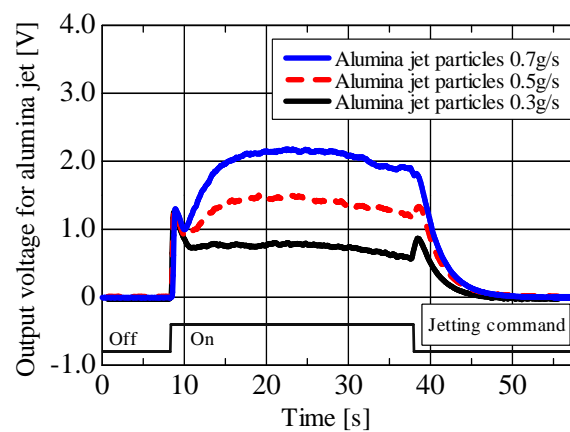
Fig. 2.8 (a), (b) および (c) は、Fig. 2.7 (a), (b) および (c) の噴射条件とそれぞれ対応している。真鍮製の検出管を使用した Fig. 2.8 とステンレス製の検出管を使用した Fig. 2.7 のどちらにおいても、輸送管を使用しないあるいは 1 m の鋼管を使用した場合には検出電圧の極性はマイナスになり、ホースを使用した場合には極性がプラスになった。また、検出電圧の値については、輸送管を使用しない場合と鋼管を使用した場合では、真鍮製よりもステンレス製の検出管を使用した方が高い検出電圧を示した。一方、ホースを使用した場合においては、真鍮製の検出管を使用したほうがステンレス製の検出管よりも高い検出電圧を示した。ステンレス製および真鍮製の検出管において、粉体流量が同一でも検出電圧に差が生じたのは、検出管の材質によって電荷の帯電量が異なるためと考えられる。



(a) Jet test with no transport pipe



(b) Jet test with a steel pipe



(c) Jet test with a rubber hose

Fig. 2.8 Jet test with a brass pipe (4 interrupt sticks)

2.4.6 粉体流量と検出電圧の関係

Fig. 2.9 に、ステンレス製および真鍮製の検出管に、インタラプトスティック 4 本を取り付けたそれぞれの供試体において、 $0.2 \text{ g/s} \sim 1.0 \text{ g/s}$ の流量で粉体粒子を噴射したときの試験結果を示す。図中のプロットは、同じ条件で噴射試験を数回行った平均値を示す。

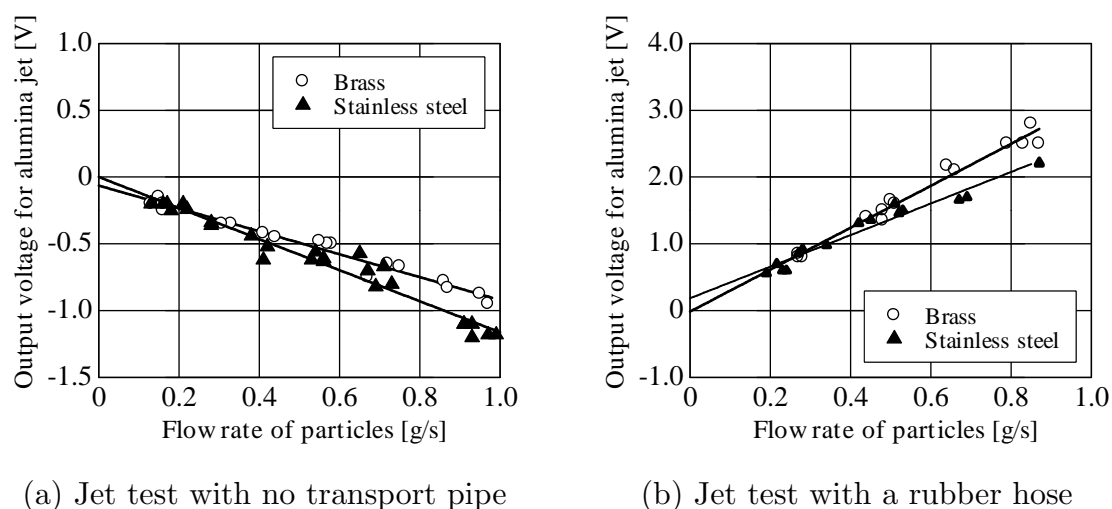


Fig. 2.9 Correlation between particle flow rate and output voltage

Fig. 2.9 (a) は輸送管を使用しない場合、Fig. 2.9 (b) は輸送管にホースを使用した場合の測定結果である。Fig. 2.9 (a) と Fig. 2.9 (b) の結果から、材質が違ってもそれぞれの供試体において、粉体粒子の流量と検出電圧との間には、良好な相関関係がある。従って、静電気測定法において検出管の内壁にインタラプトスティックを取り付けることにより、管内を流れる粉体粒子の流量を定量的に測定することができるようになったと考えられる。

2.5 結言

本章では、管内を低濃度で流れる粉体粒子の流量計測に有効な静電気の原理を用いた計測法を紹介すると共に静電気式粉体流量センサーを提案した。そして、この提案した静電気式粉体流量センサーの性能を評価するために管内を固気二相流で流れる粉体粒子の流量計測試験を行い、センサーの有効性を確認した。

- 1) インタラプトスティックを取り付けていない検出管では、輸送管を使用していない場合と鋼管を使用した場合においては、粉体粒子の流量を変えても数 10 mV 程度の検出電圧の値しか示さず、粉体流量と検出電圧との間には、相関関係が確認できなかった。一方、輸送管にゴムホースを使用した場合では、粉体流量の増加に伴い検出電圧が増加する傾向を示した。
- 2) インタラプトスティックを数本取り付けた検出管では、検出電圧は数 100 mV 以上の値を示し、取り付けていない場合に比べて、輸送管の有無に関わらず、高い検出感度を示した。
- 3) 静電気測定では、アルミナ粉体流量が 0.2~0.7 g/s の流量変化を検出可能で、静電容量測定で検出可能な粉体流量 2.0~5.0 g/s よりも一桁小さいオーダーの流量変化を検出できた。
- 4) 輸送管に鋼管あるいはゴムホースを使用すると、検出電圧はそれぞれマイナスとプラスの異なる極性を示した。
- 5) 検出管の形状は同一で、材質が異なると、検出電圧の検出感度が異なることが確認できた。
- 6) インタラプトスティックを 4 本取り付けた検出管では、粉体粒子の流量と検出電圧との間に、相関関係が確認でき、粉体粒子の流量を定量的に測定できることが確認できた。
- 7) それぞれの検出管について 100 回以上の噴射試験を繰り返し行ってきたが、検出感度が低下するような経時変化はなかった。

記号

a	: constant defined by Eq. (2.6)	[—]
b	: constant defined by Eq. (2.6)	[C · kg ⁻¹]
D_1	: inner diameter of a pipe	[m]
D_p	: particle diameter	[m]
ε_0	: permittivity of air	[F · m ⁻¹]
I	: electric current	[A]
m	: powder-to-air mass flow ratio	[—]
m_p	: particle mass	[kg]

$n(x)$: number of collisions of a particle	$[-]$
q	: particle charge	$[C]$
$(q/m_p)_0$: initial charge per unit mass of particles	$[C \cdot kg^{-1}]$
S	: contact area between particle and wall	$[m^2]$
Δt	: duration of contact	$[s]$
\bar{u}	: average air velocity	$[m \cdot s^{-1}]$
V	: potential difference	$[V]$
V_b	: potential difference affected by space charge	$[V]$
V_c	: contact potential difference	$[V]$
V_e	: potential difference affected by image charge	$[V]$
\bar{v}	: average particle velocity	$[m \cdot s^{-1}]$
W_p	: powder flow rate	$[kg \cdot s^{-1}]$
z_0	: gap between contact bodies	$[m]$
ρ_p	: particle density	$[kg \cdot m^{-3}]$
τ	: time constant of electrification	$[s]$

参考文献

- 1) Williams, R. A.; "Multi-phase Flow Measurements in Powder Processing," *Powder Technology*, **66**, 203-224 (1991)
- 2) 松山裕, 実用 流量測定, 財団法人 省エネルギーセンター, 第 1 版, pp. 201-212 (1999)
- 3) Oliveira, J. L. G., J.C. Passos, R. Verschaeren and C. Geld; "Mass Flow Rate Measurements in Gas-Liquid Flows by Means of a Venturi or Orifice Plate Coupled to a Void Fraction Sensor," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **33**, 253-260 (2009)
- 4) Mason, D. J. and J. Li; "A Novel Experimental Technique for the Investigation of Gas-Solids Flow in Pipes," *Powder Technology*, **2**, 203-212 (2000)
- 5) Bernier, R. N. and C. E. Brennen; "Use of the Electromagnetic Flowmeter in a Two-Phase Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, **9**, No. 3, 251-257 (1982)

- 6) Xu, K. J. and X. F. Wang; "Signal Modeling of Electromagnetic Flowmeter under Sine Wave Excitation Using Two-Stage Fitting Method," *Sensors and Actuators A*, **136**, 137-143 (2007)
- 7) Lee, D. W., H. C. No and C. H. Song; "Measurement of Two-Phase Mixture Level Using an Ultrasonic Method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **29**, 609-614 (2005)
- 8) Masuda H., K. Higashitani, H. Yoshida, Powder Technology Handbook, CRC Press, 3rd ed., pp. 795-804 (2006)
- 9) Furgason, E. S., V. L. Newhouse, N. M. Bilgutay and G. R. Cooper; "Application of Random Signal Correlation Techniques to Ultrasonic Flaw Detection," *Ultrasonics*, 11-17 (1975)
- 10) Gajewski, J. B.; "Non-intrusive Solids Charge and Mass Flow Measurements with an Electrostatic Flow Probe," *Journal of Electrostatics*, **46**, 271-284 (1999)
- 11) Zhang, J, J. Coulthard, R. Cheng and R. Keech; "Measuring Pulverised Fuel Using Electrostatic Meters," *Proceedings of the 7th International Conference on Measurement and Control of Granular Materials*, 3-7 (2006)
- 12) Fuchs, A., H. Zangl, M. J. Moser and T. Bretterklieber; "Capacitive Sensing in Process Instrumentation," *Metrology and Measurement Systems, XVI*, 557-568 (2009)
- 13) Tortora, P. R., S. L. Ceccio, S. M. Trujillo, T. J. O'Hern and K. A. Shollenberger; "Capacitance of Solid Concentration in Gas-Solid Flows," *Powder Technology*, **148**, 92-101 (2004)
- 14) 井伊谷鋼一, 粉粒体計測ハンドブック 日本粉粒体工業協会 編, 第 1 版, pp. 401-403, 日刊工業新聞社 (1981)
- 15) Bates, C. J. and B. Franklin; "The Performance Characteristics of a Novel Multi-Electrode Electromagnetic Flowmeter," *Measurement*, **35**, 399-408 (2004)
- 16) Alvarado, J., J. Mireles Jr and G. Soriano; "Development and Characterization of a Capacitance-Based Microscale Flowmeter," *Flow Measurement and Instrumentation*, **20**, 81-84 (2009)

- 17) Gajewski, J. B.; "Static Characteristics of an Electrostatic Flow Probe," *Journal of Electrostatics*, **48**, 49-64 (1999)
- 18) Hirota, M., Y. Sogo, T. Marutani and M. Suzuki; "Effect of Mechanical Properties of Powder on Pneumatic Conveying in Inclined Pipe," *Powder Technology*, **122**, 150-155 (2002)
- 19) Ahmed, W. H. and B. I. Ismail; Innovative Techniques For Two-Phase Flow Measurements, Recent Patens on Electrical Engineering, Bentham Science Publishers Ltd., **1**, 1-13 (2008)
- 20) Lech, M.; "Mass Flow Rate Measurement in Vertical Pneumatic Conveying of Solid," *Powder Technology*, **114**, 55-58 (2001)
- 21) Masuda, H., S. Matsusaka, S. Akiba and H. Shimomura; "Electrification of fine particles in gas-solids pipe flow," *KONA Powder and Particle*, **16**, 216-222 (1998)
- 22) Matsusaka, S., M. Ghadiri and H. Masuda; "Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate," *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **33**, 2311-2319 (2000)
- 23) 独立行政法人 労働安全衛生総合研究所, 労働安全衛生総合研究所技術指針 静電気安全指針 2007, 労働安全衛生総合研究所, JNIOHS-TR-No.42, pp. 90-106, (2007)
- 24) Matsusaka, S. and H. Masuda; "Electrostatics of particles," *Advanced Powder Technol.*, **14**, 143-166 (2003)
- 25) Matsusaka, S. and H. Masuda; "A New Method for Measurement of Powder Flow Rate Based on Static-Electrification," *THE MICROMERITICS (Funsai)*, **39**, 92-99 (1995)

第 3 章

ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの振動特性評価

3.1 緒言

前章では、振動を伴わない定常状態で管路内を増粘着材が低濃度で流れる場合について、粉体流量の定量測定を行うことにより静電気式測定法の有効性^{1), 2), 3)}を検証した。その結果、定常状態において提案したセンサーの噴射検出性能は安定しており、増粘着材噴射の流量測定に有効であることが明らかになった。また、この測定法で粉体流量の検出感度を向上させる方法として、静電気の検出部に着目し、その構造に改良を加えることで、感度が向上することを確認した。

増粘着材噴射装置は車両に搭載されることから、振動が測定時の検出感度に影響を及ぼすと考えられる。このような振動を伴う環境下にある装置において、静電気測定法における粉体の流量測定の可能性については、これまで十分な検証はされてこなかった。しかしながら、本研究で開発対象とするセンサーは鉄道車両に搭載して使用することから、振動の影響を受ける^{4), 5)}。そのため、振動状態でも定常状態と同様に増粘着材噴射を安定して検出できなければならない。

そこで、本章では、増粘着材噴射装置に取り付けられている輸送管を振動させ、輸送管の管路内に粉体粒子を空気と混合した固気二相流で流し、そのときの粉体の流量測定を静電気測定法を用いて行い^{6), 7), 8)}、振動が粉体の流量測定に与える影響を検証した。

具体的には、ベンチ試験においてセンサーを加振機に取り付けて振動試験を行った。試験条件は、振動数、加速度振幅のパラメータを変えることにより行った。センサーの振動が固有振動数である場合、センサーの噴射検出性能に影響を及ぼすと考えられる。そのため、インパルスハンマー^{9), 10)}によりセンサーの固有振動数を求め、固有振動数がセンサーの噴射検出性能に与える影響について検討した。

3.2 実験装置および試験方法

3.2.1 実験装置

Fig. 3.1 に、実験に使用した装置の概略を示す。装置は、コンプレッサー、空気タンク、電磁弁、レギュレータ、空気流量計、温・湿度計、空気圧力計、増粘着材噴射タンク（以下、セラジェットタンクと呼ぶ）、輸送管、粉体粒子の静電気量を検出する静電気式粉体流量センサー（以下、センサーと呼ぶ）および測定した静電気（電流）を電圧に変換し、さらにその電圧を増幅させるための I-V 変換アンプ（三協パイオテック（株）製，ESA-11）、動電式加振機（（株）アカシ製，E-DE45）、噴射ノズル、計測制御用 PC およびデータレコーダで構成されている。センサーの振動特性を調べるために、インパルス・ハンマー（PCB（株）製，086C05 型）と信号増幅用アンプ、硬質プラスチック製の可変チップ、アンチエイリアスフィルタ（NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 製，P-84）、ひずみゲージ、動ひずみ計、記録用のデータレコーダ（SONY（株）製，PCCX32Ax）を用いた。噴射指令の On-off 制御，信号測定および解析用に計測制御用 PC を用いた。

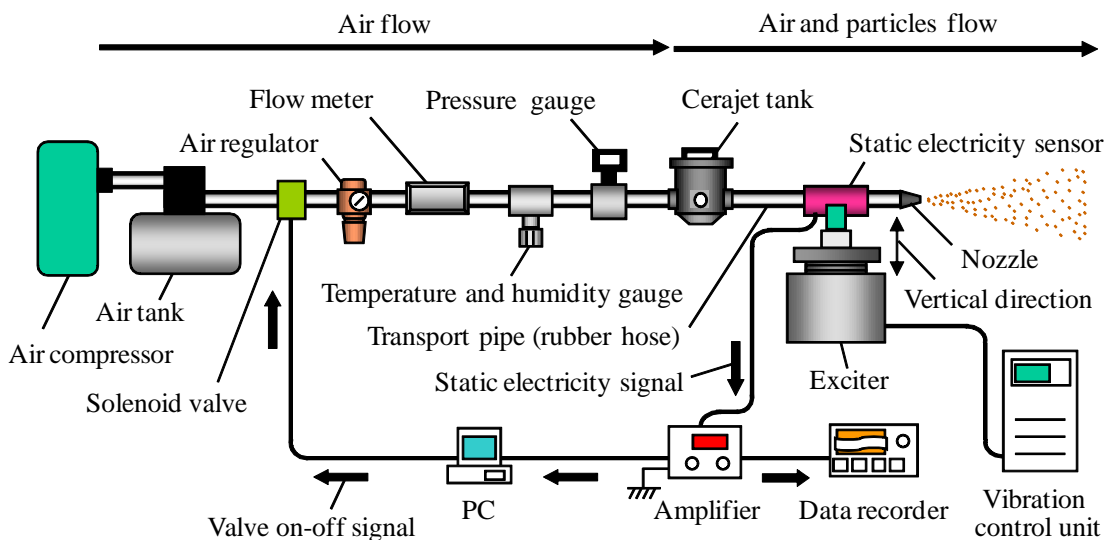


Fig. 3.1 Experimental apparatus

Fig. 3.2 に、センサーの概略を示す。センサーはステンレス製の円筒状の外管と内管から構成されている。円筒形状の内管（以下，検出管と呼ぶ）は長さ 80 mm，穴径 $\phi 10$ mm で，外部とはセラミックス製のアイソレータで電氣的に絶縁されて

おり、管内を流れる空気の漏れを防止するために、円形状のゴムパッキンでシールされている。検出管の内壁には検出感度を向上させるために直径 $\phi 3.0 \text{ mm}$ の金属棒 (以下、インタラプトスティックと呼ぶ) をらせん状に 4 本取り付けられている。この検出管は I-V 変換アンプの + 極、外管は - 極と接続されている。

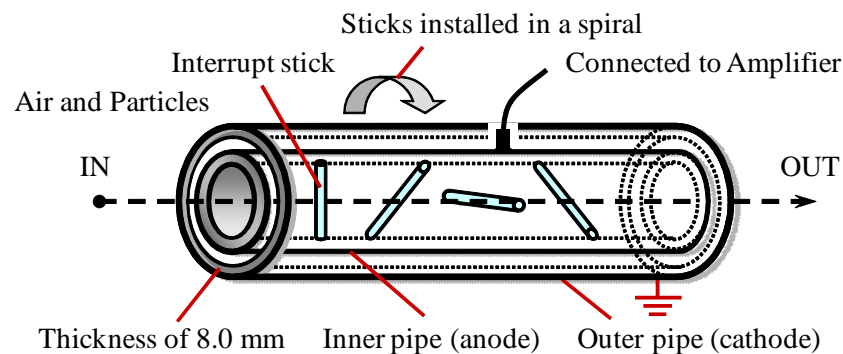


Fig. 3.2 Sensor and detection pipe

3.2.2 振動条件下での噴射検出特性

振動条件下において、センサーを用いて粉体粒子の流量測定を行い、検出電圧が振動によってどのような挙動を示すか調べるために、センサーを加振機に取り付けて、加振しながら噴射試験を行った。センサーを治具を介して加振機に取り付け、加速度片振幅 (以下、加速度振幅と呼ぶ) および加振周波数を設定し、上下方向に正弦波で加振した。加速度振幅とは、加振機で発生させた正弦波による振動において振幅が最大となるときの加速度を言う。

粉体粒子は、計測制御用 PC (以下、PC と呼ぶ) によって電磁弁を開くことにより、噴射される。電磁弁が開くと、コンプレッサーで作られた圧縮空気はレギュレータにより設定した空気流量となる。その空気は混合装置内に流れ込み、混合装置内の粉体粒子と空気の流量が調整されて固気二相流となり、輸送管、加振機上に取り付けたセンサーおよびノズルまで到達し、ノズル先端部の直径 $\phi 2.5 \text{ mm}$ の穴から噴射される。空気搬送により輸送管内を流れてきた粉体粒子は、管内壁と繰り返し衝突することにより静電気が発生し帯電する。このとき混合装置と輸送管の途中に取り付けたセンサー (検出管) には、帯電した粉体粒子とは逆極性の電荷が発生する^{11), 12)}。この検出された電荷 (微小電流) を、I-V アンプで増幅し、さらに電圧に変換する。変換したモニター用の電圧 (以下、検出電圧と呼ぶ) を接続した PC およびデータレコーダに出力し測定した。

3.2.3 固有振動での噴射検出特性

振動のモード解析を簡易的に行う方法^{13), 14)}として、打撃加振法（インパルス法）が挙げられる．そこで、この打撃加振法^{15), 16), 17)}を用いて、センサーの固有振動数を求めた．Fig. 3.3 に概略を示す．Fig. 3.3 は、センサーおよび取り付け治具、定盤を垂直方向に切断した断面図である．Fig. 3.3 に示すように、センサーおよび取り付け治具は定盤上にしっかり固定されている．円筒状の外管の内側にある検出管の上側と下側には、ひずみゲージを 2 枚貼り、ひずみゲージにつながっている電線は外管に開けた直径 $\phi 11.0\text{ mm}$ の穴から外に取り出し、動ひずみアンプと接続した．

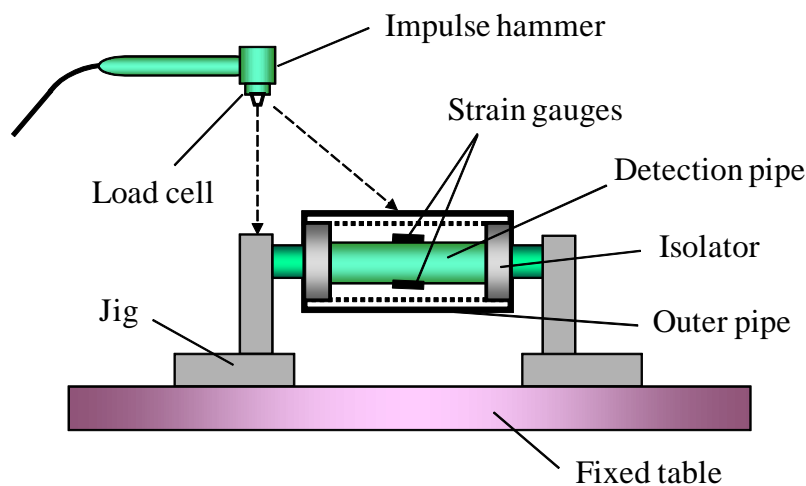


Fig. 3.3 Impact excitation testing for sensor

図中のインパルス・ハンマー先端部からのびている矢印で示された、センサー（外管）の中央、および取り付け治具の支持（上部）を、インパルス・ハンマーで叩き、加振させた^{18), 19)}．このときインパルス・ハンマーに取り付けたロードセルにより加振力を推定し、センサー（検出管）に貼ったひずみゲージにより振動応答を測定した．測定した信号は、それぞれサンプリング周波数 5 kHz で A/D 変換して PC に入力し、FFT 解析を行って、固有振動数を求めた^{20), 21)}．折り返し雑音を防ぐために、アンチエイリアスフィルタ（ローパスフィルタ）を周波数 2 kHz で挿入した．

3.2.4 耐振動特性

センサーは、振動を伴う鉄道車両の台車枠部分に取り付けて使用されるため、振動の影響を受ける。振動によりセンサーが損傷すると車両から脱落する恐れがあるため、振動に対するセンサーの耐振性能を確認することは不可欠である。鉄道の車両部品としてセンサーを使用する場合、日本規格協会 (JIS) で定められている E 4031「鉄道車両部品-振動試験方法」に基づく振動耐久試験において、耐振性に関する基準が満たされていなければならない²²⁾。

3.2.5 試験条件

増粘着材には質量中位径が 0.3 mm のアルミナを、またセラジェットタンクにはタンク内の有効容積が 1.0 l の T10 型タンクを使用する。セラジェットタンクとセンサーの間に接続する輸送管は、長さが 1 m で穴径 $\phi 12$ mm の高圧用合成ゴムホース ((株) ブリヂストン製, O.K.EXCEL) を使用した。空気圧力はゲージ圧で 0.6~0.7 MPa, 噴射時間は 30 s, 測定した電流の電流-電圧変換比は $\pm 1.0 \times 10^9$ V/A とした。加振機での加振条件は、垂直方向に加速度振幅 98 m/s^2 (10G), 196 m/s^2 (20G), 294 m/s^2 (30G), 加振周波数 58~1000 Hz で行った。ここで、加速度振幅は正弦波振動において振幅 $d \times$ 角振動数 ω の 2 乗 (m/s^2) の式で表せる。打撃加振試験については、加振周波数 1.0~1000 Hz の範囲で測定を行った。測定時の温・湿度は、それぞれ室内温度が 28~33 °C, 噴射時の空気湿度が 46.5~75.1 % であった。試験条件を Table 3.1 に示す。

Table 3.1 Experimental conditions

Acceleration [m/s ²]	0, 98, 196, 294
Excitation frequency [Hz]	1.0~10 ³
Air flow rate [l/min]	250~300
Particle flow rate [g/s]	0.3, 0.5, 0.7
Sampling rate [Hz]	5.0×10 ³
Transport pipe	Rubber hose
Detection pipe	SUS304
Isolator	Ceramics
Antialiasing filter [Hz]	Cut off frequency 2.0×10 ³
Jetting time [s]	30
Jetting particle	Alumina ϕ 0.3 mm
I-V charge rate [V/A]	$\pm 1.0 \times 10^9$
Temperature [°C]	28~33
Humidity [%]	46.5~75

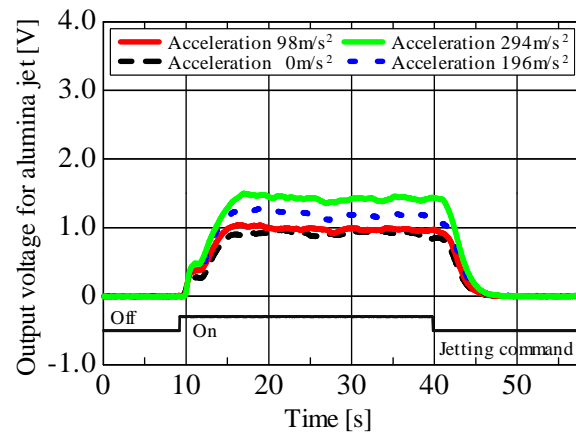
3.3 振動が検出電圧に与える影響

3.3.1 加速度振幅と粉体流量の影響

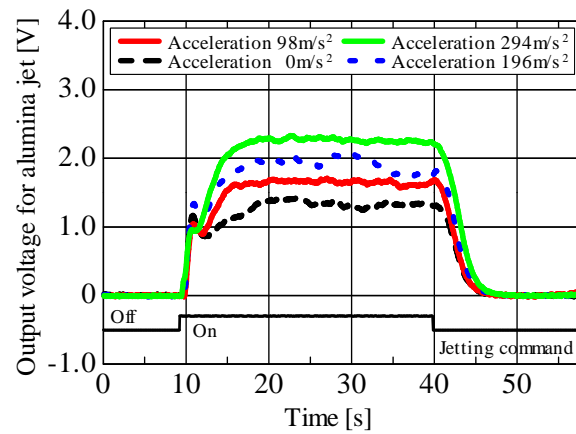
Fig. 3.4 に、加振機に取り付けたセンサーを、加速度振幅 98 m/s^2 , 196 m/s^2 , 294 m/s^2 で加振しながら、それぞれ粉体流量を 0.3 g/s , 0.5 g/s , 0.7 g/s の 3 段階で噴射したときの検出電圧の測定結果を示す。ここでは、加振周波数はいずれも 100 Hz とした。図中の Jettig command は電磁弁の開閉の信号である。粉体流量がそれぞれ 0.3 g/s , 0.5 g/s , 0.7 g/s である Fig. 3.4 (a), (b), (c) のどの場合においても、加速度振幅が大きくなるにつれて、検出電圧も高い値を示す結果となった。このように粉体流量あるいは加速度振幅が増加することによって検出電圧が大きくなった理由は、いずれの条件でも、輸送管や検出管の内壁と衝突する粉体粒子の数が増加したためと考えられる。

センサーの加振の有無で検出電圧を比較すると、いずれの粉体流量でも、加振しない場合に比べて加振した場合の方が高い検出電圧の値を示した。特に粉体流量がそれぞれ 0.5 g/s , 0.7 g/s である Fig. 3.4 (b), (c) において、センサーの加速度振幅を 294 m/s^2 で加振した場合には、加振しない場合に比べて、検出電圧が 1.0 V 程度増加した。このことから、振動条件下において流量測定を行う際には、振動の影響を考慮して使用する必要がある。

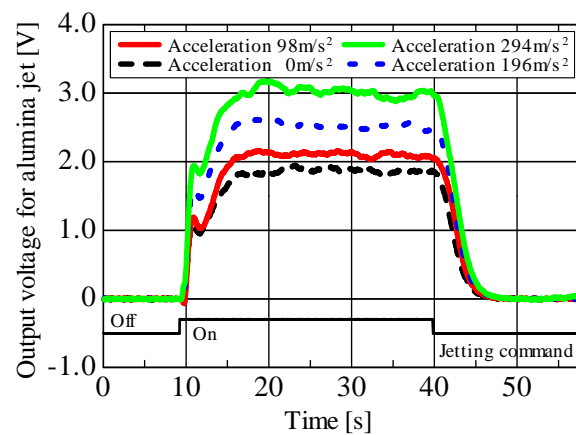
次に噴射波形に注目すると、センサーは最大で加速度振幅 294 m/s^2 で加振されているにも関わらず、加振しない場合と同様に、検出電圧の噴射波形は安定している。このことから、振動を伴う環境下においても、このセンサーを用いた粉体流量の測定が可能であることが分かった。



(a) Particle flow rate: 0.3 g/s



(b) Particle flow rate: 0.5 g/s



(c) Particle flow rate: 0.7 g/s

Fig. 3.4 Influence of acceleration (frequency: 100 Hz, rubber hose)

Fig. 3.5 に、加振周波数を 100 Hz で一定とし、加速度振幅 98 m/s^2 , 196 m/s^2 , 294 m/s^2 のそれぞれの加振条件において、粉体流量を 0.3 g/s , 0.5 g/s , 0.7 g/s の 3 段階で噴射したときの粉体流量と検出電圧の関係を加速度振幅ごとに測定した結果を示す。

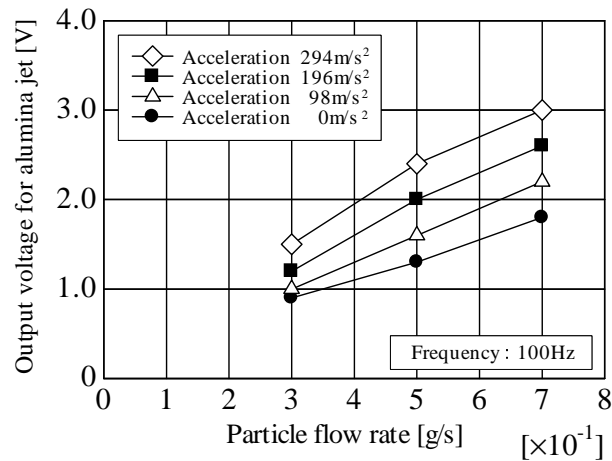


Fig. 3.5 Influence of acceleration and particle flow rate

Fig. 3.5 から、検出電圧は加速度振幅の増加、あるいは粉体流量の増加とともに、ほぼ直線的に増加することが分かった。

3.3.2 加振周波数の影響

センサーを加振させた場合、振動条件である加振周波数が増加すると、それに伴い管内を流れる粉体粒子と管内壁の衝突回数が増加し、検出電圧は増加する傾向を示すはずである。そこで加振周波数と検出電圧に上記のような相関があるかどうかを調べるために以下の条件で試験を行った。

加速度振幅を 98 m/s^2 , 196 m/s^2 , 294 m/s^2 とし、加振周波数を 58 Hz ～ 1000 Hz の範囲で条件を変えて、粉体流量を 0.5 g/s で噴射した。そのときの検出電圧と加振周波数の関係を加速度振幅ごとに測定した結果を Fig. 3.6 に示す。

この場合、加振周波数 f と変位振幅 d (以下、単に振幅と呼ぶ) の間には、次式の関係が成り立つ¹⁸⁾。ただし、 a は加速度振幅 (m/s^2) である。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{d}} \quad (3.1)$$

Fig. 3.6 より，加速度振幅をそれぞれ 98 m/s^2 ， 196 m/s^2 ， 294 m/s^2 で加振した場合，加速度振幅が大きい程，加振周波数のすべての領域において検出電圧は高い値を示した．また，どの加速度振幅においても，検出電圧は周波数が 58 Hz から 1000 Hz まで増加するとともに減少傾向を示した．

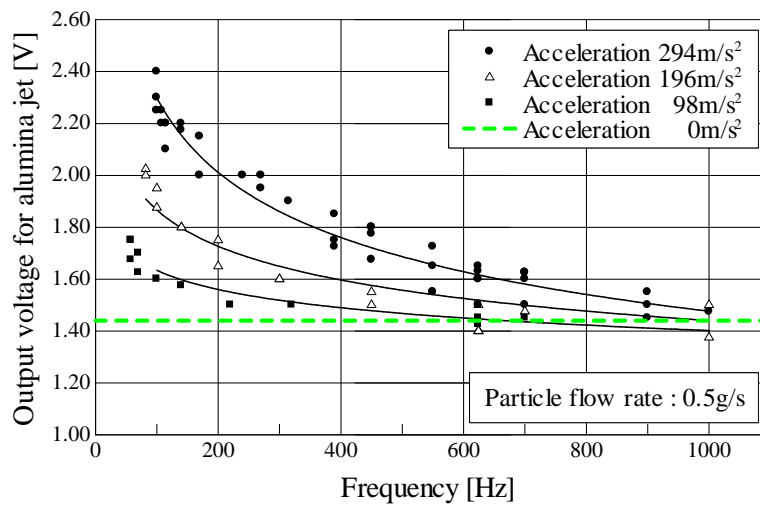


Fig. 3.6 Influence of frequency under vibration conditions

管内壁における粉体粒子の衝突回数は，センサーを加振させると増加する．その結果，同一の加速度振幅で加振周波数を増加させると検出電圧は高くなるはずである．しかしながら実験では，加振周波数が増加すると検出電圧は減少する傾向を示した．すなわち，周波数が高く速い振動において，検出電圧は振動に追従しておらず，検出管内で発生する発生電流は振動による影響を受けなくなる結果となった．実験で得られた結果と粉体理論から導き出される結果が異なった原因は，振幅が小さくなったことによるものと推察される．

次に，加振周波数と振幅の間には前述の Eq. (3.1) の関係が成り立つことから，Fig. 3.6 の横軸を振幅に置き換えてプロットした図を Fig. 3.7 に示す．

Fig. 3.7 より，振幅が 0.005 mm あるいは 0.0065 mm で加速度振幅を 98 m/s^2 ， 196 m/s^2 としたときのそれぞれのプロットは，加振しない場合の検出電圧 1.44 V を表す破線と交差していることが分かる．このことから，振幅が 0.005 mm 以下で加振した場合には，加振しない場合の検出電圧 1.44 V 程度となり，振幅が

0.005 mm 以下では振動による影響を受けなくなることが分かった．この点をふまえ，検出電圧 y と振幅 x の対数 $\ln x$ の関係を検出電圧 1.44 V，振幅 0.005 mm の点を通過する直線 $y = A \ln x + B$ で近似した．

ここで， A, B は定数である．最小二乗法を用いて計算した結果，定数 A, B はそれぞれ加速度振幅が 98 m/s^2 のとき 0.05 と 1.70， 196 m/s^2 のとき 0.09 と 1.93， 294 m/s^2 のとき 0.16 と 2.29 となった．Fig. 3.7 に示す実線は，加速度振幅が 98 m/s^2 ， 196 m/s^2 ， 294 m/s^2 のそれぞれについて，近似式で求めた近似直線である．

Fig. 3.7 の近似直線が，データに対して妥当性があるかどうか判断するために，Fig. 3.4 (b) の測定結果と比較した．Fig. 3.4 (b) の場合，加振周波数が 100 Hz 一定で，加速度振幅が 98 m/s^2 (振幅 0.25 mm)， 196 m/s^2 (振幅 0.5 mm)， 294 m/s^2 (振幅 0.75 mm) のときの検出電圧はそれぞれ 1.64 V，1.93 V，2.29 V である．この Fig. 3.4 の加速度振幅が 196 m/s^2 の場合の検出電圧を Fig. 3.7 の近似直線と比較すると検出電圧の差は 0.06 V 程度で，加速度振幅が 98 m/s^2 と 294 m/s^2 の場合の検出電圧の場合は，ほぼ近似直線上に検出電圧のプロットが位置する．この結果から，求めた近似直線は Fig. 3.7 のデータに対して精度が高く，有効であると推測される．

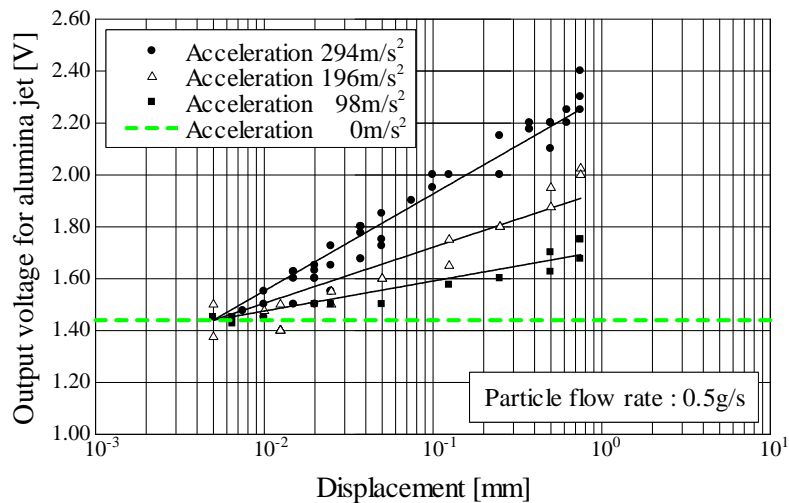


Fig. 3.7 Influence of amplitude under vibration conditions

この Fig. 3.7 の近似直線から，振幅が同じ場合には加速度振幅が 98 m/s^2 ， 196 m/s^2 ， 294 m/s^2 と大きくなるに従って検出電圧も増加し，振幅が大きくなると検出電圧も増加することが明らかになった．

3.4 固有振動が検出電圧に与える影響

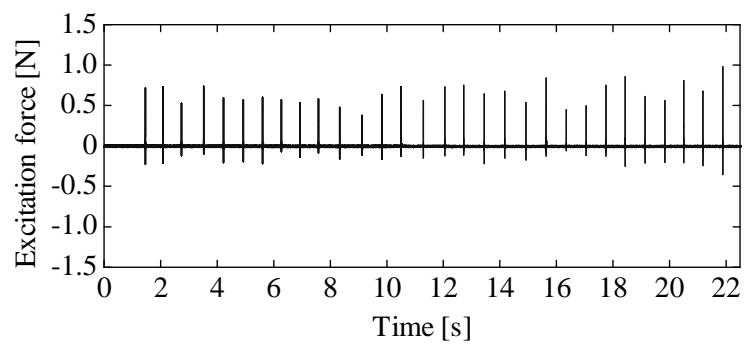
3.4.1 固有振動数解析

外部からセンサーの固有振動数と一致した振動数の振動がセンサーに与えられた場合、その振動によってセンサーには共振現象が生じる。このような振動条件下において、センサーを用いて粉体流量の測定を行うと、検出電圧は共振現象によって影響を受けると思われる。そこで、センサーの固有振動数を調べるために、打撃加振試験を行った。

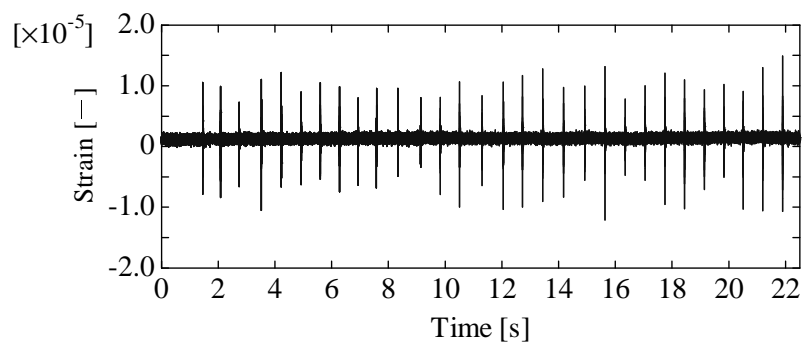
Fig. 3.8 に、打撃加振試験で得られた結果を示す。Fig. 3.8 (a) は、インパルス・ハンマーで加振したときの信号波形である。信号波形には、センサーを加振させるためにハンマーで 30 回定期的に叩いたことを示すパルス波形が見える。Fig. 3.8 (b), (c) は、検出管の上側と下側に貼ったひずみゲージで測定した振動応答である。インパルス・ハンマーによる加振力のパルス波形と同様のタイミングで、振動応答のパルス波形が表れており、検出管が加振力に対して応答していることが分かる。加振力に対する応答を表すひずみ量は、 10×10^{-6} 程度の小さいひずみ量であった。

Fig. 3.9 に、測定した Fig. 3.8(a), (b) のパルス波形について、それぞれ FFT 解析を行い、加振力に対する検出管の上側で測定したひずみの伝達関数を求めた結果を示す。Fig. 3.9 より、解析した周波数 1.0~1000 Hz において、固有振動数と見られるピークが 595 Hz に存在することが分かった。

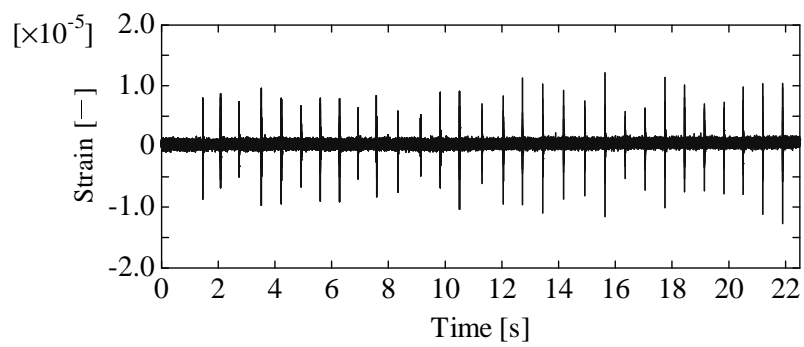
次に、Fig. 3.9 に示された振動波形について、加振力に対するひずみとの間の相関を表すコヒーレンス関数を Fig. 3.10 に示す。検出管の上側のひずみゲージで測定したひずみは微小な量であるが、Fig. 3.10 に示すように、コヒーレンスが固有振動数付近で 0.9 以上と大きいことから、求めた固有振動数は信頼性があると判断できる。また、検出管の下側のひずみゲージにおいても同様の結果を得た。さらに、センサーが取り付けられている支持部についても、インパルス・ハンマーでの打撃加振試験を行い、同様の周波数にピークが表れることを確認した。



(a) Excitation pulse of impulse hammer



(b) Response pulse of strain gauge (top surface)



(c) Response pulse of strain gauge (bottom surface)

Fig. 3.8 Vibration pulse of impulse hammer and strain gauge

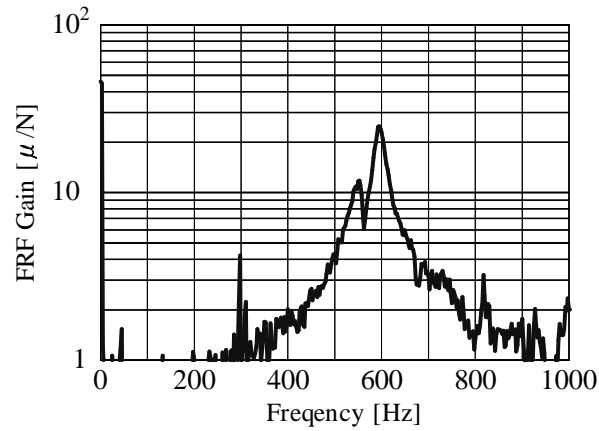


Fig. 3.9 Transfer function between excitation force and vibration response

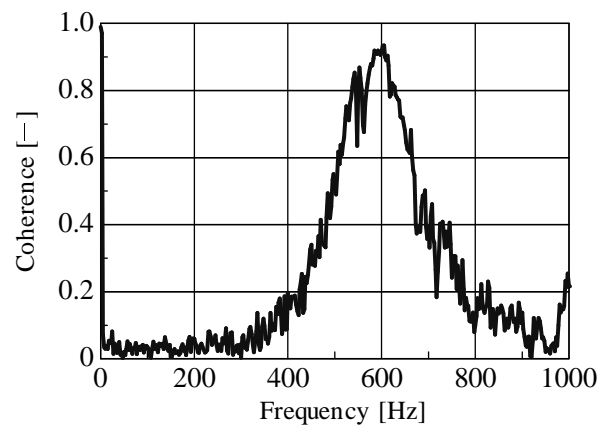


Fig. 3.10 Coherence between excitation force and vibration response

3.4.2 固有振動数の影響

共振現象を生じる固有振動での振動が、検出電圧にどのような影響を与えるのかを調べるために、センサーを固有振動数で加振しながら、粉体粒子の噴射試験を行った。Fig. 3.11 に、加振周波数を固有振動数 595 Hz で、加速度振幅をそれぞれ 98 m/s^2 , 196 m/s^2 , 294 m/s^2 として、センサーを加振した場合と加振しない場合について、粉体流量を 0.5 g/s で噴射したときの検出電圧の測定結果を示す。

Fig. 3.11 の加速度振幅が異なるそれぞれの場合について検出電圧を比較したが、センサーを加振した場合と加振しない場合では、検出電圧は最大で 0.3 V 程度の差であった。一方、前述 Fig. 3.4 (b) の加振周波数を 100 Hz で加振した場合には、検出電圧は加速度振幅の増加とともに増加し、加振しない場合と比べて検出電圧は 1.0 V 程度の差があった。このことから、固有振動数 595 Hz で加振した

場合の方が、加振周波数 100 Hz で加振した場合に比べて、同一の加速度振幅に対して検出電圧が低く、かつ加速度振幅の差を受けにくいという結果となった。

この結果は、以下の様に解釈できる。Eq. (3.1) が成り立つと仮定すると、加振周波数が 5.95 倍になれば、同一の加速度振幅に対して振幅 d は $1/35$ に減少する。Fig. 3.7 に示した振幅と検出電圧の関係が加振周波数に関係なく成り立つと仮定すると、加振周波数 595 Hz において、加速度振幅がそれぞれ 98 m/s^2 , 196 m/s^2 , 294 m/s^2 の場合の振幅と検出電圧の推定値は、(0.007 mm, 1.45 V), (0.014 mm, 1.55 V), (0.021 mm, 1.67 V) となる。このように、加振周波数 595 Hz で加振した場合に検出電圧が加速度振幅の差を受けにくい結果となったのは、周波数上昇による振幅減少の影響であり、加振周波数と固有振動数が一致したことが原因ではないと考えられる。

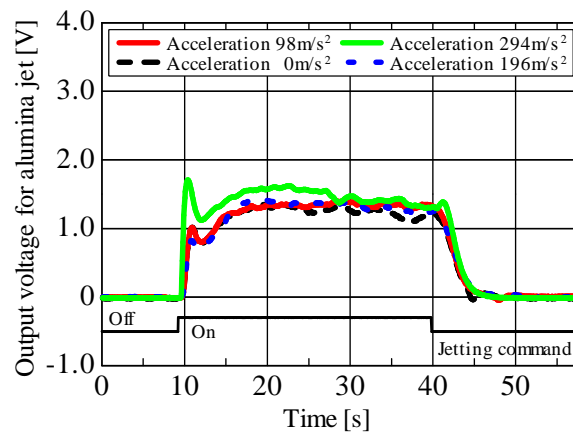


Fig. 3.11 Influence of sensor resonance frequency (particle flow rate : 0.5 g/s)

振動特性上、問題と考えられた、センサーの固有振動数で加振した状態での噴射試験では、検出電圧は特異な挙動を示すことはなく、加振周波数と検出電圧の間には連続した相関関係が認められた。また、このときの検出電圧の噴射波形は加振しない場合と同様に安定した波形を示し、センサーは共振現象の影響を受けることなく測定が可能であった。

これらの試験結果から、静電気センサーは変動がなく振動が一定の振動条件下では、管内の粉体粒子の流れの有無を検知することが可能で、粉体粒子の定量測定も可能であることが分かった。振動が一定でなくランダムに変動するような振動条件下においては、粉体粒子の流れの有無を検知することは可能であるが、粉体粒子の定量測定を行うためには振動によって検出電圧が受けた影響を取り除いたり、あるいは補正するような工夫が更に必要と考えられる。

3.4.3 振動耐久性

振動に対するセンサーの耐振性能を確認するために、日本規格協会 (JIS) の鉄道車両部品-振動試験方法に基づき振動耐久試験を行った。本センサーは、鉄道車両の台車枠部分に取り付けて使用されることから、上記 JIS の振動試験方法の中の 5 種 (台車枠又はばね下部分に取り付ける部品) および C 種 (共振がある場合) を試験条件に適用した。試験は、3.2.3 節の Fig. 3.3 のセンサーと取り付け治具を加振機の振動台に固定し、共振周波数 595 Hz でセンサーをそれぞれ前後、左右、上下方向に規定されている時間振動させた。振動耐久試験を行ったが、センサーの外観および内部構造に損傷はなかった。また、試験終了後に増粘着材の噴射を行いセンサーの性能を確認したが、正常に動作した。この結果から、センサーが振動に対して耐久性を有していることを確認した。

3.5 結言

本章では、振動条件下における静電気式粉体流量センサーの増粘着材噴射検出性能を検証するために、加振機によるベンチ試験を行った。その結果、振動条件下において、本センサーが増粘着材の噴射検出に有効であることを確認した。

- 1) 加振条件下においても、流量測定による検出電圧の噴射波形は、加振しない場合と同様に安定した波形であった。
- 2) センサーの固有振動数は 595 Hz で、固有振動数での加振条件でも共振現象の影響を受けず、安定して測定ができた。
- 3) センサーを加振した場合、検出電圧は加振条件である加速度振幅および振幅によって影響を受けることを確認した。加振時の振幅が 0.005 mm 以下の場合には振動の影響を受けないことが明らかになった。
- 4) 加振条件である加速度振幅、あるいは振幅が増加すると、振動している輸送管あるいは検出管内において、それぞれの管の内壁と衝突する粉体粒子の数が増加し、その結果検出電圧が大きくなったものと推測される。
- 5) 当センサーは振動を伴う環境下において、粉体粒子の流れを監視するモニタリング装置として使用する場合には、振動条件の変動の有無に関わらず有効である。

- 6) JIS E 4031 に基づく振動耐久試を行い，当センサーが鉄道用車両部品としての耐振動性の基準を満たしていることを確認した．

参考文献

- 1) Matsusaka, S., H. Fukuda, Y. Sakura, H. Masuda and M. Ghadiri; "Analysis of Pulsating Electric Signals Generated in Gas-Solids Pipe Flow," *Chemical Engineering Science*, **63**, 1353-1360 (2008)
- 2) Park, A. A. and L. Fan; "Electrostatic Charging Phenomenon in Gas-Liquid-Solid Flow Systems," *Chemical Engineering Science*, **62**, 371-386 (2007)
- 3) Yan, Y.; "Mass Flow Measurement of Bulk Solids in Pneumatic Pipelines," *Meas. Sci. Technol.*, **7**, 1687-1706 (1996)
- 4) Suzuki, Y., S. Chonan and K. Akatsu; "Vibration Analysis on Truck Frame of Railway Vehicle Considering its Flexural Rigidity," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **63**, 611, 2221-2228 (1997)
- 5) 横堀進, 鉄道車両工学, 第 1 版, pp. 244-261, 共立全書 (1963)
- 6) 粉体工学会, 第 43 回 技術討論会・テキスト, pp. 95-103, 粉体工学会 (2008)
- 7) Gajewski, J. B.; "Electrostatic Flow Probe and Measuring System Calibration for Solids Mass Flow Rate Measurement," *Journal of Electrostatics*, **45**, 255-264 (1999)
- 8) 村田雄司, 静電気の基礎と帯電防止技術, 第 1 版, pp. 55-73, 日刊工業新聞社 (2001)
- 9) Roebben G., B. Bollen, A. Brebels, J. Van Humbeeck and O. Van der Biest; "Impulse Excitation Apparatus to Measure Resonant Frequencies, Elastic Moduli, and Internal Friction at Room and High Temperature", *American Institute of Physics, Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 12, December, 4511-4515 (1997)
- 10) Iwahara, M., T. Sugiura and A. Nagamatsu; "Improvement of Accuracy and Reliability of Experimental Modal Analysis (Invention on

- Impact Testing and Decrease of Measurement Error),” *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **64**, 618, 158-165 (1998)
- 11) Xu, C., S. Wang, G. Tang, D. Yang and B. Zhou; ”Sensing Characteristics of Electrostatic Inductive Sensor for Flow Parameters Measurement of Pneumatically Conveyed Particles,” *Journal of Electrostatics*, **65**, 582-592 (2007)
 - 12) Matsusaka, S., H. Maruyama, T. Matsuyama and M. Ghadiri; ”Triboelectric Charging of Powders,” *Chemical Engineering Science*, **65**, 5781-5807 (2010)
 - 13) モード解析ハンドブック編集委員会, モード解析 第1版, pp. 48-67, コロナ社 (2000)
 - 14) Braian, J. S., M. H. Richardson, Experimental Modal, Analysis, CSI’s 1999 Reliability Week, Orlando, Florida, 1-12, October (1999)
 - 15) Ewins D. J., Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd ed., pp. 186-189, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England (1993)
 - 16) Wayne, T., A minimal mathematical Introduction to the Fundamentals of Random Vibration & Shock Testing - Measurements, Analysis and Calibration -, 1st ed., pp. 375-391, Equipment Reliability Institute, Santa Barbara, California, USA (2005)
 - 17) Cyril, M. H., Shock and Vibration Handbook, 4th ed., pp. 21.2-21.74, McGraw-Hill (1996)
 - 18) Champoux, Y., V. Cotoni, B. Paillard and O. Beslin; ”Moment of excitation of structures using two synchronized impact hammers,” *Journal of Sound and Vibration*, **263**, 515-533 (2003)
 - 19) Shirai, M. and M. Tanabe; ”Excitation Techniques for Modal Testing (1st Report, Proposition of Random Impact Method),” *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **55**, 509, 7-12 (1989)
 - 20) Kaewunruen, S. and A.M. Remennikov; ”Application of Experimental Modal Testing for Estimating Dynamic Properties of Structural

- Components,” *Proceedings of Australian Structural Engineering Conference 2005*, Australia, 11-14 September, CD-ROM (2005)
- 21) William, G. H. and D. L. Brown; ”Impulse Technique for Structural Frequency Response Testing,” *Proceedings of Sound and Vibration*, November, 8-21 (1977)
- 22) 日本規格協会, JIS E 4031-1994 「鉄道車両部品-振動試験方法」, pp. 1-5, 日本規格協会 (1994)

第 4 章

ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの耐久性・信頼性評価

4.1 緒言

車輪とレールの間の接触部が乾燥状態の場合、鉄道車両では空転や滑走といった車輪の粘着力に関する問題について議論される^{1),2)}ことは少ない。一方、降雨や降雪時のような湿潤状態の場合、車輪とレールの間の粘着力は乾燥状態よりも低下するため、車輪の滑走や固着が問題となる³⁾。そのため、滑走や固着の防止を目的としたメカニズムの解明や新技術の開発が進められている^{4),5)}。

滑走によるブレーキ距離の延伸あるいは車輪やレールに生じる損傷は、車両の安全性⁶⁾や乗り心地の低下を招く^{7),8),9)}ため防止しなければならない¹⁰⁾。そこで、車輪とレールの間の粘着力を向上させるために、先頭車両に取り付けている増粘着材噴射装置を用いる¹¹⁾。これを用いることにより、先頭から最後尾の編成列車内のすべての車輪の滑走を防止できる。

現在、この装置は在来線や新幹線の車両で採用されており、高い信頼性を有する装置として実績を残している¹²⁾。新幹線電車では、非常ブレーキと併用して使用されることから、増粘着材噴射装置の動作が確実に実行されることが求められる。増粘着材の噴射状態を検出してモニタリングすることができれば、増粘着材の噴射流量の超過や低下などの情報に基づき流量を制御することが可能となり、規定量の増粘着材噴射を高い精度で繰り返し確実に実行することができる。また、噴射不良が発生した場合でもバックアップ装置を起動することが可能になるため、噴射不良への対処にも有効である。このように増粘着材の噴射検出技術は、走行車両の安全性・信頼性をこれまで以上に向上させる技術として期待できる。

第 2 章では増粘着材の噴射状態を検出する手法として、管路内を粉体粒子が管壁と衝突しながら流れるときの粉体粒子の静電気帯電量を測定する方法^{13),14)}を試

し、静電気による測定法が有効であることを検証した。さらに、第 3 章では振動条件下におけるセンサーの噴射検出性能を検証し、振動条件下における有効性を確認した。第 2 章および第 3 章により、増粘着材噴射を行ったときのセンサーの基本性能を検証することができた。

本研究で開発したセンサーには、帯電した増粘着材粒子の電荷を検出する金属製の円筒管と電気絶縁用として用いる塩化ビニル製の円筒管が組み込まれている^{15), 16)}。増粘着材噴射を行う都度に硬質の増粘着材がこれらの円筒管の管路の内壁に繰り返し衝突するため、円筒管ではアブレシブ摩耗 (サンドエロージョン) が発生する^{17), 18), 19)}。

このような環境下でセンサーを長期使用すると、センサーの感度を向上させるために取り付けられた円筒管内部の金属棒や円筒管へ衝突する増粘着材の積算量が増加する。これにより、金属棒や円筒管の表面特性が変化する²⁰⁾のでセンサーの感度が低下する可能性がある。また、塩化ビニル製の円筒管は金属製のものに比べて摩耗量が多いことも推測される。そのため、塩化ビニル製の円筒管では管厚を超える摩耗が生じて円筒管が破損する可能性がある^{21), 22)}。増粘着材により円筒管内部の金属棒が削られて細くなると、衝突粒子の割合が減少するのでセンサーの感度の低下につながることも予想される。本センサーを実用化する場合、円筒管の表面特性の変化や摩耗量の増加によるセンサーの感度の変化を検証することは非常に重要である。円筒管の摩耗量が少なければ、管厚を薄くするなどの設計の見直しを行い、センサーの小型軽量化を図ることができる^{23), 24)}。

本章では、増粘着材噴射を繰り返す耐久性試験を実施し、センサーに組み込まれている円筒管の摩耗特性を調べる¹⁹⁾ために摩耗量、摩耗面の観察および粗さ測定を行った。また、円筒管内部の金属棒の摩耗によるセンサーの噴射検出性能の影響を調べることにより、本センサーの長期使用における耐久性および信頼性を検証した。

4.2 実験装置および試験方法

4.2.1 実験装置

実験に使用した装置の概略を Fig. 4.1 に示す。装置は、コンプレッサー、空気タンク、電磁弁、レギュレータ、空気流量計、温・湿度計、空気圧力計、増粘着材噴射タンク (以下、セラジェットタンクと呼ぶ) と輸送管および噴射ノズル

からなる増粘着材噴射装置，増粘着材噴射を制御する噴射出力制御装置 (Jetting control output device)，増粘着材の噴射流量を検出する静電気式粉体流量センサー (Static electricity sensor) および多チャンネル式の I-V 変換アンプ，データレコーダで構成されている。

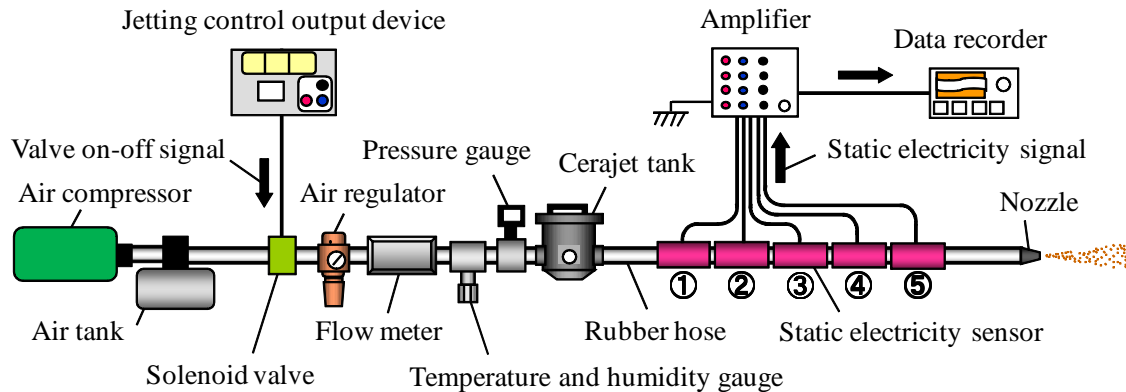


Fig. 4.1 Experimental apparatus

4.2.2 増粘着材噴射装置

鉄道車両の滑走防止に用いられる増粘着材噴射装置の動作は以下の手順で行われる。噴射指令が増粘着材噴射出力装置から電磁弁に送られると，コンプレッサーで造られた圧縮空気がセラジェットタンク内に入る。タンク内の増粘着材は圧縮空気と混合され，固気二相流の状態ではースと静電気式粉体流量センサーの中を流れて行き，ノズル先端部の直径 $\phi 2.5 \text{ mm}$ の穴から噴射される。ホースおよびノズル先端部での粒子速度は約 10 m/s と約 100 m/s である。

4.2.3 噴射出力制御装置

噴射出力制御装置は，増粘着材の噴射指令を増粘着材噴射装置に出力する。噴射時間や噴射間隔，噴射回数などの噴射条件は，制御プログラムに条件を入力することにより設定する²⁵⁾。

4.2.4 静電気式粉体流量センサー

静電気式粉体流量センサー (以下、センサーと呼ぶ) は、ホースや鋼管などの管内を流れるセラミックス粒子の流量測定が可能で、粒子の接触帯電による電荷の移動を電流として検出する装置である。センサーの構造を Fig. 4.2 に示す。

センサーは円筒状でステンレス (SUS304) 製の内管 (Inner pipe) と外管 (Outer pipe) および塩化ビニル製のアイソレータ (Isolator) で構成されている。増粘着材は空気と共にセンサーの入口 (IN) から入り、アイソレータと内管の中を衝突しながら出口 (OUT) まで流れる。内管では、帯電した粒子の電荷の検出を行う。これ以後、内管は粒子を検出する部分なので検出管 (Detection pipe) と呼ぶことにする。外管は、検出管で測定した電荷を外部のノイズと遮断するための電磁シールドでアースされている。検出管は、アイソレータにより外部と電氣的に絶縁されている。検出管の内壁には、検出感度を向上させるステンレス (SUS304) 製の金属棒 (以下、インタラプトスティックと呼ぶ) を 45° ずつ角度を変えて取り付けている。測定原理や詳細構造については第 1 章で説明したので、ここでは省略する。センサーで測定した電流は、I-V 変換アンプ (三協パイオテク (株) 製, ECV8-1) で電流から電圧に変換しデータレコーダーに記録する。電流と電圧の比較および電流から電圧に変換した後の電圧の取り扱いを容易にするために、I-V 変換アンプの電流-電圧変換比は $\pm 1.0 \times 10^9 \text{ V/A}$ とした。

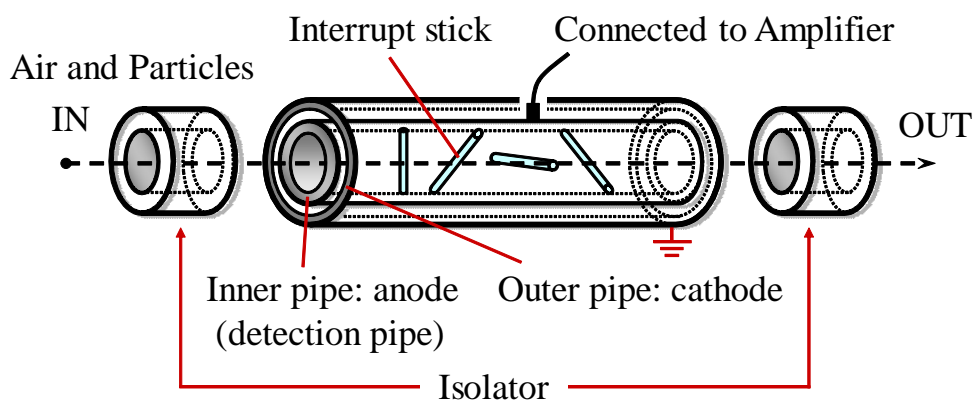


Fig. 4.2 Structure of the static electricity sensor

4.2.5 試験方法

営業車両における増粘着材の総噴射量 (以下, 積算噴射量と呼ぶ) は, 年間の車両運行日数を 300 日, 1 日の噴射回数を 2~3 回, 1 回の噴射時間を 20 s として計算した. 耐久性試験に掛かる試験時間を短縮するために増粘着材の噴射時間は 20 s ではなく 30 s とし, 積算噴射量が 15 年相当量に達するまで, 噴射時間を 30 s, 休止を 5 s とする周期で行った. 増粘着材の積算噴射量は 0.5 年, 1 年, 5 年, 10 年, 15 年相当量のときの噴射質量をそれぞれ 3.75 kg, 7.5 kg, 37.5 kg, 75 kg, 112.5 kg とした. 増粘着材噴射には 0.8~0.9 MPa の圧縮空気をを用い, 空気流量を 4.0 l/s, 増粘着材の噴射流量を 500 mg/s に設定した. 増粘着材には質量中位径が 0.3 mm のアルミナを, セラジェットタンクにはタンク内の有効容積が 0.5 l の T5 型タンクを, また輸送管には高圧用合成ゴムホースを使用する.

試験条件毎に 1 つのセンサーを単体で試験装置に取り付けて耐久性試験を行うと, 試験時間が長くなり効率的ではない. そのため, 本試験では Fig. 4.1 に示すように 5 個のセンサーを接続した状態で試験を行う. これらのセンサーの内部には検出管とアイソレータが組み込まれている. 検出管は, それぞれ長さ 80 mm, 外径 $\phi 19$ mm, 内径 $\phi 10$ mm, 管厚 4.5 mm, 質量 127 g, 内壁表面積 $2.5 \times 10^3 \text{ mm}^2$ のものを, またアイソレータは外寸長さ 12 mm, 粒子通過部長さ 5 mm, 外径 $\phi 24$ mm, 内径 $\phi 10$ mm, 管厚 7 mm, 質量 4.0 g, 内壁表面積 157 mm^2 のものを使用する. 円筒状の検出管とアイソレータをそれぞれ鉛直方向に切断した断面を Fig. 4.3 に示す.

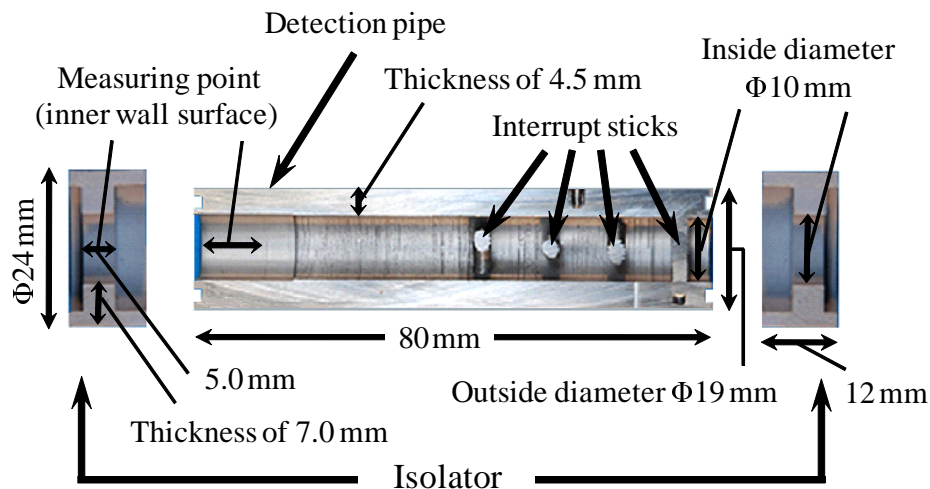


Fig. 4.3 Cross section of detection pipe and isolators

試験の操作手順は以下の通りである。まず、試験前の検出管とアイソレータの質量および管内壁の表面粗さを測定する。質量は、電子天秤により測定を行う。表面粗さは、触針式表面粗さ測定器を用いて Fig. 4.3 中の測定点 (Measuring point) の矢印方向に触針 (先端径 $2\mu\text{m}$) を移動させることにより測定を行う。測定条件は、測定長さ 4 mm, 触針送り速度 0.5 mm/s, カットオフ 0.5 mm とした。

次に、試験初期のセンサーの噴射検出性能を調べるために Fig. 4.1 の状態で増粘着材噴射を 1 回行い、そのときの噴射流量をセンサー ① で測定する。同様に、増粘着材の積算噴射量が 0.5 年相当量に達したときの噴射流量をセンサー ① で測定する。流量測定が終了したセンサー ① を試験装置から取り外す。積算噴射量が 1 年, 5 年, 10 年, 15 年相当量に達したときの噴射流量をセンサー ②～⑤ でそれぞれ測定し、流量測定が終了したものについては装置から取り外す。試験が終了したセンサー ①～⑤ を分解して検出管とアイソレータの供試体を取り出した後、供試体の質量をそれぞれ測定する。測定した供試体の試験前と試験後の質量差から、増粘着材噴射による摩耗量を求める。

センサーの検出性能評価試験では、Fig. 4.1 のように 5 個のセンサーを接続した状態で試験を行わず、1 個のセンサーを単体で接続した状態で噴射試験を行う。検出性能評価試験は、実車両における増粘着材の噴射時間が 5 s 以上であることから耐久性試験と同様に噴射時間を 30 s とし、温・湿度が 22～25 °C, 53～74 % で行った。

さらに、耐久性試験が終了した検出管とアイソレータを Fig. 4.3 のように切断した後、光学顕微鏡と粗さ測定器により図中に示す各測定部位の表面観察および粗さ測定を行う。検出管に取り付けられている直径が $\phi 3.0\text{ mm}$ の棒状のインタラプトスティックが増粘着材により摩耗すると、インタラプトスティックの直径が小さくなり、センサーの検出感度が低下する可能性がある。そのため、直径が $\phi 0.9\text{ mm}$, $\phi 2.0\text{ mm}$, $\phi 3.0\text{ mm}$ のインタラプトスティックをそれぞれ 4 本ずつ検出管に取り付けたセンサーと取り付けしていないセンサーとで増粘着材噴射を行い、インタラプトスティックの直径の大きさが異なるときのセンサーの噴射検出性能をそれぞれ調べた。

4.3 摩耗量の影響

4.3.1 検出管の摩耗量測定

増粘着材の噴射量と検出管のアブレイブ摩耗による摩耗量の関係を調べるために、試験前と試験後の検出管の質量をそれぞれ測定することにより摩耗量を求めた。測定結果を Fig. 4.4 に示す。Fig. 4.4 の●印は、積算噴射量が 0.5 年, 1 年, 5 年, 10 年, 15 年のとき測定結果である。

検出管の摩耗量は、増粘着材の積算噴射量が増加するのに伴い比例して直線的に増加した。積算噴射量が 15 年相当量の供試体では、摩耗による質量の減少量は約 350 mg であった。また、検出管の総質量に対しては約 0.28 % の減量、単位表面積当たりでは約 0.14 mg/mm^2 の減量であった。この結果から、増粘着材噴射を積算噴射量が 15 年相当量まで行っても、検出管の摩耗量は総質量に対して約 0.28 % と非常に少なく、増粘着材噴射が検出管の摩耗に与える影響は小さいことが分かった。

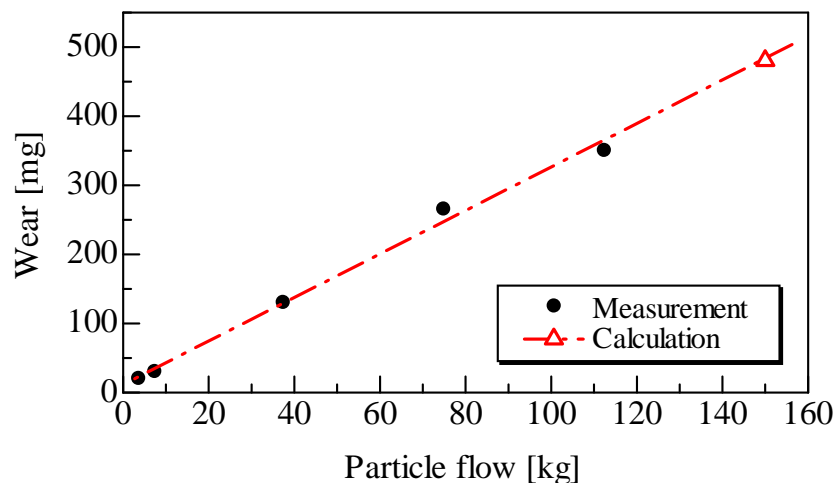


Fig. 4.4 Relationship between particle flow rate and wear of inner pipes

本報における耐久性試験では、積算噴射量が 15 年相当量までの検出管の摩耗について調べた。しかし、鉄道車両には 20 年近く使用される車両もある。そこで、積算噴射量が 20 年相当量 (噴射質量 150 kg) のときの摩耗量を上記で得られた測定結果に最小二乗法を用いて直線近似することにより推定した。

Fig. 4.4 の破線は近似直線を示し、破線上のプロット (△印) は 20 年相当量の

ときの推定値である。この推定値から、積算噴射量が 20 年相当量のときの検出管の摩耗量は、摩耗により質量の減少が約 480 mg、質量に対する減量が約 0.38 %、表面積当たりの減量が約 0.19 mg/mm^2 となることが分かった。積算噴射量が 20 年相当量まで検出管を使用しても摩耗量が少ないと推定されることから、検出管は 20 年相当までの長期間の使用が可能であると思われる。

4.3.2 アイソレータの摩耗量測定

増粘着材の積算噴射量とアイソレータのアブレーション摩耗による摩耗量の関係を調べるために、増粘着材の積算噴射量が 0.5 年、1 年、5 年、10 年、15 年相当量のときのアイソレータの試験前と試験後の質量をそれぞれ測定することにより摩耗量を求めた。測定結果を Fig. 4.5 に示す。Fig. 4.5 の●印は、積算噴射量が 0.5 年、1 年、5 年、10 年、15 年のときの測定結果である。

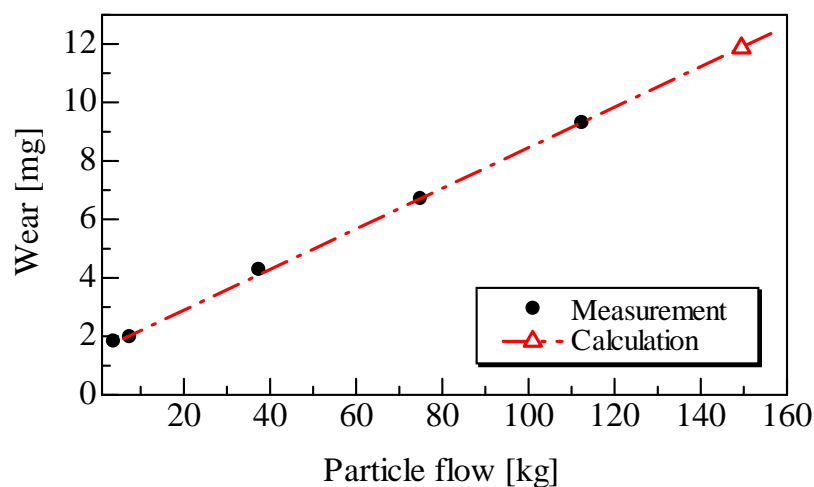


Fig. 4.5 Relationship between particle flow rate and wear of isolators

アイソレータの摩耗量は、増粘着材の積算噴射量が増加するのに伴い増加した。積算噴射量が 15 年相当量の供試体では、摩耗による質量の減少量は約 9.3 mg であった。測定結果からアイソレータの摩耗量を求めると、総質量に対しては約 0.23 % の減量、単位表面積当たりでは約 0.059 mg/mm^2 の減量する結果となった。この結果から、積算噴射量が 15 年相当量までの噴射を行っても、アイソレータの摩耗量は非常に小さく、増粘着材噴射がアイソレータの摩耗に与える影響が小さいことが分かった。

次に、4.3.1 節と同様に Fig. 4.5 の実験結果に最小二乗法による直線近似を用いることにより 20 年相当量のときの摩耗量を推定した。Fig. 4.5 の破線は近似直線を示し、破線上のプロット (△印) は 20 年相当量のときの推定値である。この推定値から、積算噴射量が 20 年相当量のときのアイソレータの摩耗量は、摩耗による質量の減少が約 11.9 mg, 総質量に対する減量が約 0.3 %, 表面積当たりの減量が約 0.076 mg/mm^2 となることが分かった。アイソレータは試験を開始すると短時間で急激に摩耗した。0.5 年, 1 年の測定結果のみから長期の摩耗を推定すると非常に大きな値になるが、長期間の実験結果をみると、1 年後以後はなだらかに直線的に摩耗量が増加した。このことから、長期間の運転を想定した実験の必要性が明らかとなった。積算噴射量が 20 年相当量のときのアイソレータの摩耗量を推定した結果、アイソレータは検出管と同様に積算噴射量が 20 年相当量までの期間使用が可能であると考えられる。

4.4 円筒管の表面形状変化による影響

4.4.1 検出管の表面観察

検出管内壁の増粘着材噴射によるアブレシブ摩耗の影響を調べるために、光学顕微鏡を用いて検出管内壁の表面観察を行った。観察結果を Fig. 4.6 に示す。

Fig. 4.6 (a) は試験前, Fig. 4.6 (b), (c), (d) は試験後で積算噴射量がそれぞれ 1 年, 5 年, 15 年相当量のときの検出管内壁の表面である。試験前の Fig. 4.6 (a) の供試体には、検出管の製作過程にできた旋盤のバイトによるすじ状の加工傷が見える。しかし、試験後の Fig. 4.6 (b), (c), (d) の供試体には Fig. 4.6 (a) のようなすじ状の加工傷は見られず消えている。これは、増粘着材が検出管の内壁に衝突することにより内壁が摩耗したため、すじ状の加工傷が消えたことを示す。Fig. 4.6 (b), (c), (d) より積算噴射量の違いによる表面状態に顕著な差は見られなかった。光学顕微鏡によるインタラプトスティックの表面観察を行ったが、試験前は光沢がある表面で試験後は増粘着材により摩耗したためざらついた表面であった。試験前後のインタラプトスティックの直径の大きさの変化を調べたが、直径の大きさにほとんど変化は認められなかった。

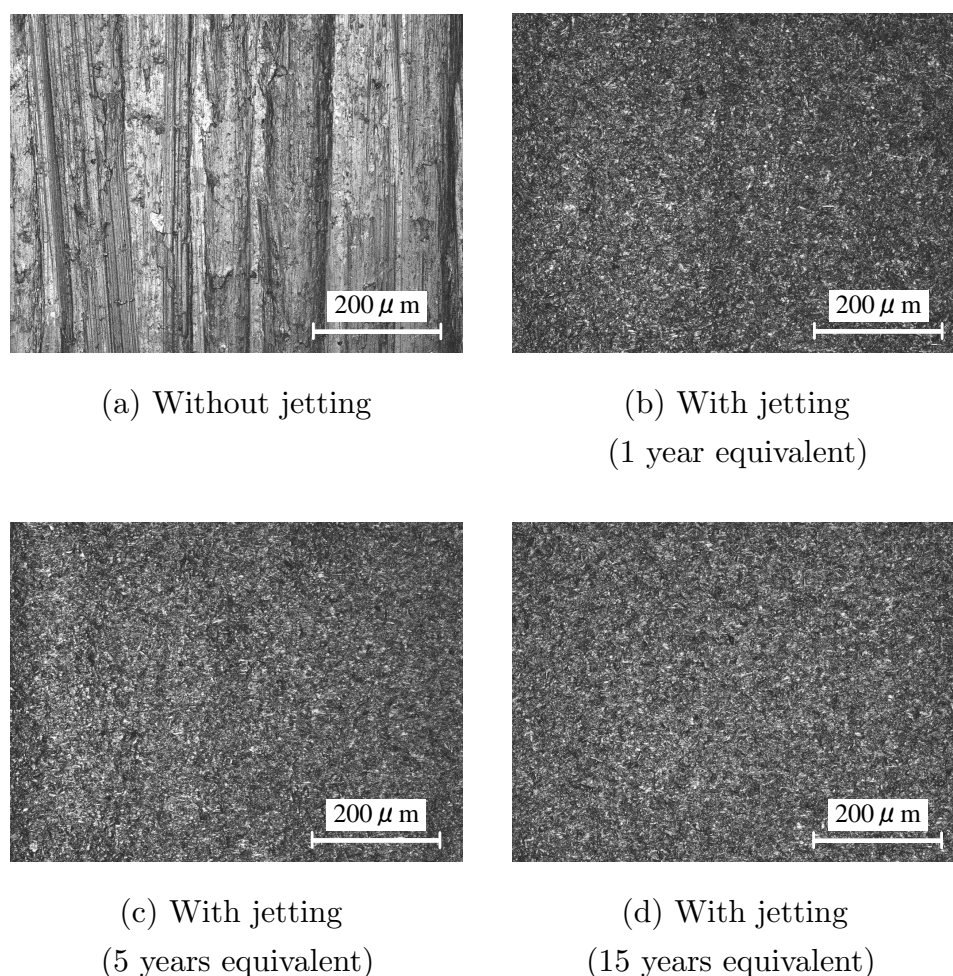
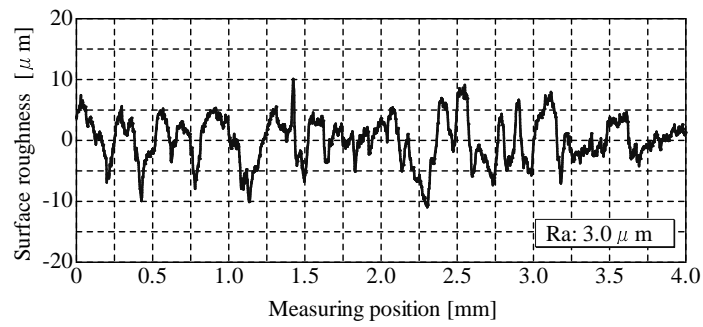


Fig. 4.6 Optical microscope images of surface states of inner pipes

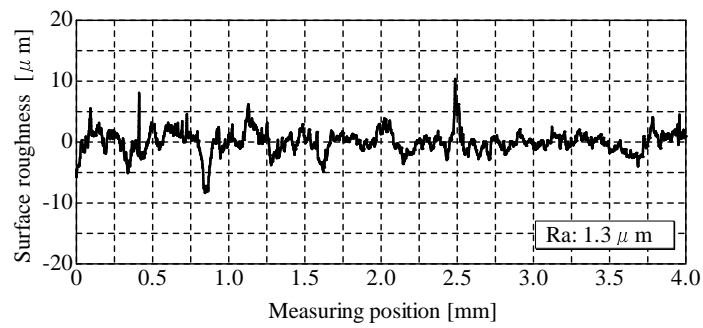
4.4.2 検出管の表面粗さ測定

4.4.1 節の光学顕微鏡観察を行った Fig. 4.6 (a), (b), (c), (d) について，摩耗による表面の変化量を調べるために表面粗さ測定器を用いて定量測定を行った．Fig. 4.6 に示した各供試体の粗さを水平方向に測定した結果を Fig. 4.7 に示す．Fig. 4.7 (a) は試験前，Fig. 4.7 (b), (c), (d) は試験後で積算噴射量がそれぞれ 1 年，5 年，15 年相当量のときの検出管内壁の表面粗さ曲線である．試験前と試験後の表面粗さ曲線の結果を比較すると，試験後は試験前に比べて表面粗さ曲線の振幅が小さくなっている．また，試験前と試験後の算術平均粗さ R_a の結果を合わせて Fig. 4.7 中に示す．ここで， R_a は平面形状の平均値からの差の絶対値の平均である（定義を示す）．この値を比較すると，試験前の算術平均粗さ R_a が最も大きく，開始してから 1 年相当量までは粗さが減少する割合が大きく，それ以

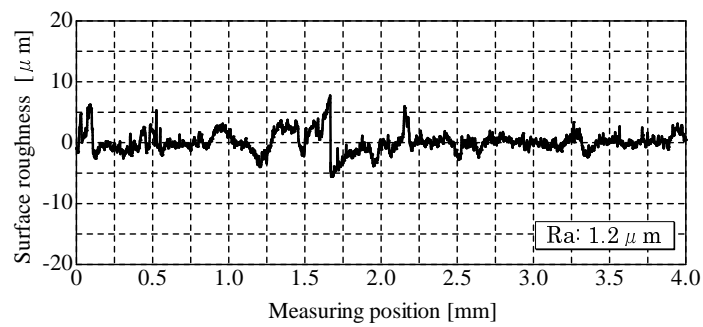
後は緩やかに粗さが減少する傾向を示した。試験前と積算噴射量が最も多い 15 年相当量のときの算術平均粗さの結果を比較すると、積算噴射量が 15 年相当量のときの方が試験前に比べて算術平均粗さ R_a は $2.1\ \mu\text{m}$ の減少であった。



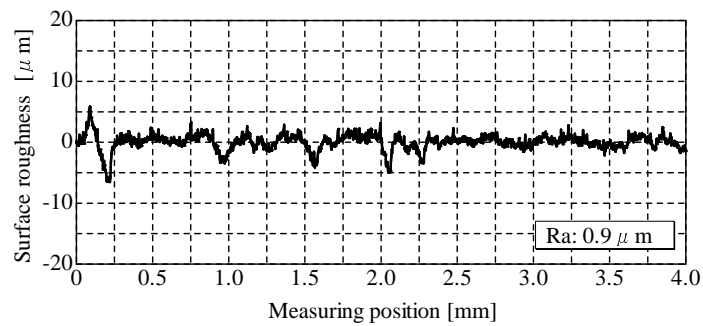
(a) Without jetting



(b) With jetting (1 year equivalent)



(c) With jetting (5 years equivalent)



(d) With jetting (15 years equivalent)

Fig. 4.7 Surface roughness of inner pipes

4.4.3 アイソレータの表面観察

4.4.1 節と同様にアイソレータ内壁の増粘着材噴射によるアブレイブ摩耗の影響を調べるために、アイソレータ内壁の表面観察を行った。観察結果を Fig. 4.8 に示す。

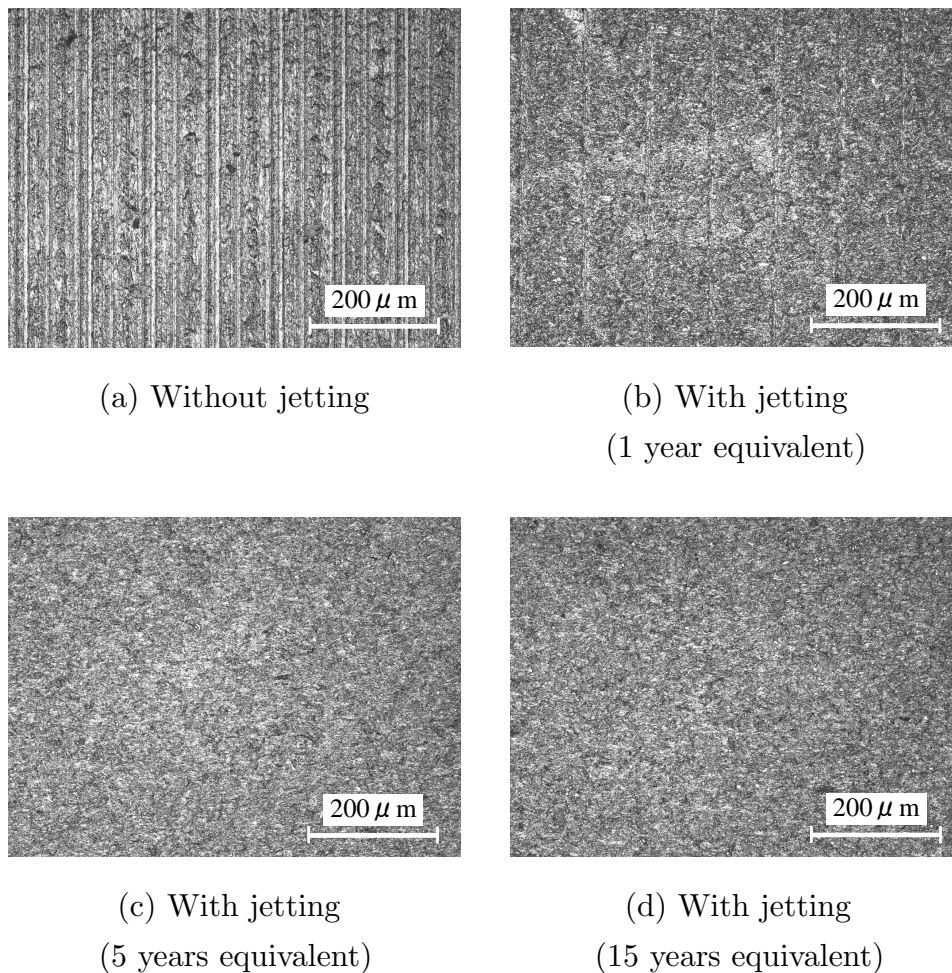


Fig. 4.8 Optical microscope images of surface forms of isolators

Fig. 4.8 (a) は試験前、Fig. 4.8 (b), (c), (d) は試験後で積算噴射量がそれぞれ 1 年、5 年、15 年相当量の際のアイソレータ内壁の表面である。

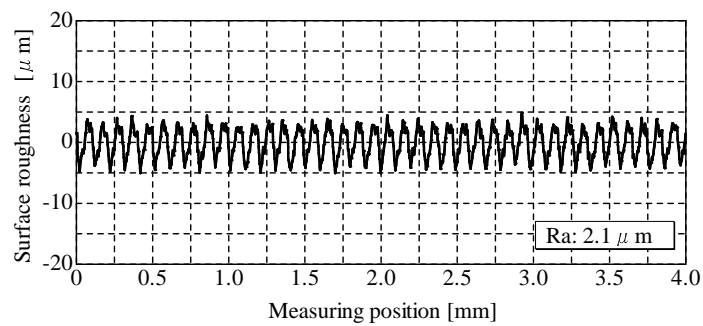
試験前の Fig. 4.8 (a) の供試体と試験後の積算噴射量が 1 年相当量の Fig. 4.8 (b) の供試体には、検出管と同様に旋盤のバイトによってできたすじ状の加工傷が見える。しかし、Fig. 4.8 (c), (d) の積算噴射量が 5 年と 15 年相当量のアイソレータには、Fig. 4.8 (a), (b) のような旋盤によるすじ状の加工傷は観察されな

かった。これらの結果から、検出管の場合と同様にアイソレータ内壁表面のすじ状の加工傷は、増粘着材がアイソレータ内壁に衝突したことにより、内壁が摩耗して消えたことを示している。Fig. 4.8 (c) と Fig. 4.8 (d) の内壁表面において、積算噴射量の違いによる表面状態に顕著な違いは見られなかった。

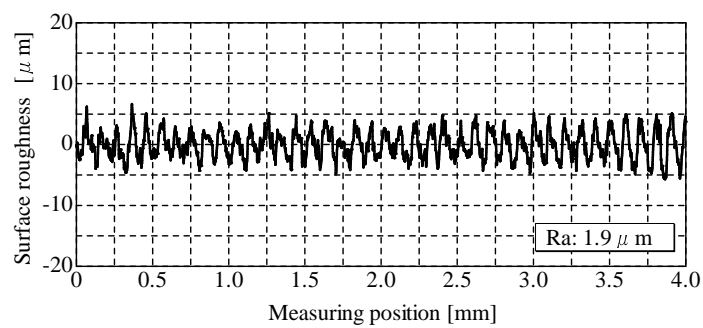
4.4.4 アイソレータの表面粗さ測定

4.4.3 節の光学顕微鏡観察を行った Fig. 4.8 (a), (b), (c), (d) について、摩耗による表面の変化量を調べるために表面粗さ測定器を用いて定量測定を行った。Fig. 4.8 に示した各供試体の粗さを水平方向に測定した結果を Fig. 4.9 に示す。

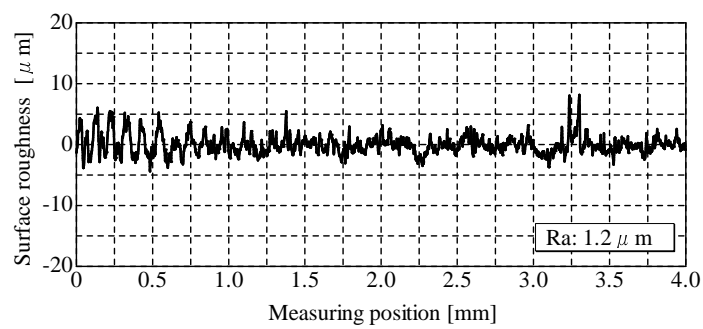
Fig. 4.9 (a) は試験前、Fig. 4.9 (b), (c), (d) は試験後で積算噴射量がそれぞれ 1 年、5 年、15 年相当量のときの検出管内壁の表面粗さ曲線である。試験前と試験後の表面粗さ曲線の結果をそれぞれ比較すると、試験前の表面粗さ曲線の振幅は大きく規則的であるのに対して試験後の振幅は、管内壁が増粘着材により摩耗したため小さく不規則な形状になっていることが分かる。また、試験前と試験後の算術平均粗さ R_a の結果を比較すると、試験後の方が試験前に比べて算術平均粗さ R_a が減少し、積算噴射量が増加するのに伴い粗さ R_a も減少している。試験前と試験後の積算噴射量が最も多い 15 年相当量のときの結果を比較すると、管内壁は増粘着材により摩耗するため、算術平均粗さ R_a は $1.2\ \mu\text{m}$ の減少であった。



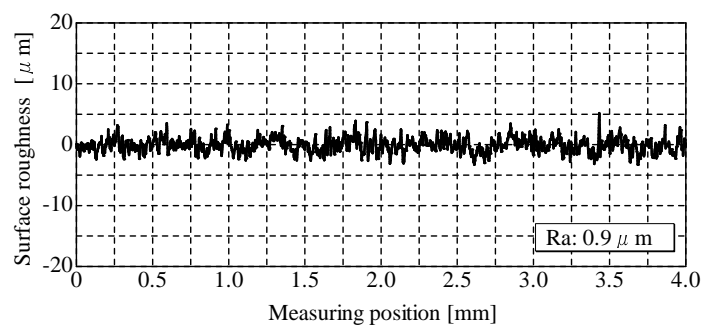
(a) Without jetting



(b) With jetting (1 year equivalent)



(c) With jetting (5 years equivalent)



(d) With jetting (15 years equivalent)

Fig. 4.9 Surface roughness of isolators

4.5 センサーの噴射検出性能評価

4.5.1 インタラプトスティックの摩耗による影響

増粘着材による摩耗でインタラプトスティックの直径が小さくなったときのセンサーの噴射検出性能の変化を調べるために、直径が異なる $\phi 0.9\text{ mm}$, $\phi 2.0\text{ mm}$, $\phi 3.0\text{ mm}$ のインタラプトスティックをそれぞれ検出管に 4 本ずつ取り付け付けたセンサーと取り付けしていないセンサーにおいて増粘着材噴射を行った。Fig. 4.10 に測定結果を示す。

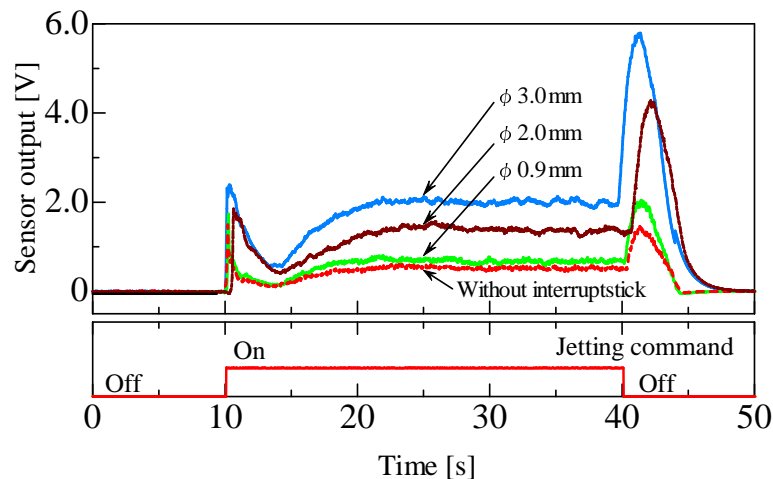


Fig. 4.10 Relationship between sensor output and diameter of interrupt sticks

図中の電圧波形をそれぞれ見ると、噴射指令開始後に小さなピークが現れ、一旦下がりその次に変化が少なく安定した状態が続き、噴射指令終了後に大きなピークが現れている。この 2 つの電圧波形のピークは、増粘着材噴射装置によって噴射を行うときに現れる装置特有のもので、いずれも噴射が安定するのに必要な空気流量を満たしていない非定常状態のときのものである。Fig. 4.10 の電圧波形の形状は、前述の第 2 と第 3 章のものとは明らかに異なる。これは、セラジェットタンク内の容積が 0.5 l と 1.0 l の大きさが異なるタンクを第 4 章と第 2, 第 3 章でそれぞれ用いているからである。2 つのピークは、以下のような理由により生じたものと考えられる。噴射指令が終了すると電磁弁が閉じてコンプレッサーからセラジェットタンクに供給される空気が遮断されるが、Fig. 4.1 の構造から分かるように、噴射指令終了時には噴射タンク内には加圧された空気が残存している。高压空気の流入が急に遮断されることにより、噴射タンク内の気流が乱れ、一定流

量で空気が流れていた状態に比べ多量の増粘着材が一時的に噴射タンクより流出する。噴射指令終了後に現れる大きなピークはこの増粘着材の流れをセンサーで検出したものである。この流出した増粘着材の一部は、空気の流速が遅くなることにより外部まで流出せず、輸送管内やセンサー内に残存する。噴射指令開始直後に現れるピークは、この輸送管あるいはセンサー内に残存していた増粘着材をセンサーで検出したものである。輸送管あるいはセンサー内に残存していた増粘着材が流出後、噴射タンク内から流出する増粘着材を検出するまでに遅れがあるため、計測値は一度減少している。

この 2 つのピークの電圧パターンは、実際の運転時には振動等の条件により増粘着材のばらつきに依存し一定の波形にならないが、2 つのピークに挟まれた部分は、空気供給が一定で安定した増粘着材噴射が行われていることから、電圧値もほぼ一定の値をとる。よって本実験では噴射指令開始から 15 s 後の電圧を測定し、このときの電圧を検出電圧とした。

Fig. 4.10 の測定結果からインタラプトスティックの直径と検出電圧の関係を表したものを Fig. 4.11 に示す。検出管にインタラプトスティックを取り付けた供試体では、インタラプトスティックの直径が $\phi 3.0\text{ mm}$, $\phi 2.0\text{ mm}$, $\phi 0.9\text{ mm}$ と小さくなるに従い、検出電圧は 2.0 V, 1.5 V, 0.7 V と減少した。検出管にインタラプトスティックを取り付けていない供試体のときの検出電圧は 0.5 V であった。直径 $\phi 3.0\text{ mm}$, $\phi 2.0\text{ mm}$, $\phi 0.9\text{ mm}$, $\phi 0\text{ mm}$ (取り付け無し) のインタラプトスティックを取り付けた場合、取り付け部の流路断面積は、 49 mm^2 , 59 mm^2 , 70 mm^2 , 79 mm^2 となる。よって、インタラプトスティックの直径が小さくなると、センサーの検出感度が低下するのは、増粘着材が衝突する面積の減少に加え、インタラプトスティック挿入による流れの乱れの減少が原因と考えられる。

Fig. 4.11 においてインタラプトスティックの直径が大きくなるにつれ検出電圧の増加比率が大きいのは、上述した増粘着材の衝突断面積の増加と流れが乱れる効果が大きく影響したものと考えられる。この結果から、増粘着材の噴射流量をセンサーで測定する場合、検出電圧とインタラプトスティックの直径には相関関係があり、硬質の増粘着材に対して耐摩耗性を有する材質のものをを用いる必要があることが分かった。

本センサーは増粘着材噴射が行われているかどうかの有無を測定するために使用され、噴射流量に比例した電圧が出力される。また、規定噴射流量 (以下、規定流量) の 500 mg/s で増粘着材を噴射したときの検出電圧を 100 % とすると、約 80 % まで規定流量が減少しても増粘着材噴射が適正に行われていると判定している。そのため、規定流量で噴射を行ったときの検出電圧がインタラプトスティッ

クの摩耗により低下しても、規定流量のときの検出電圧の 80 % を下回ってはならない。センサーの実用においては検出電圧の低下は 10 % 程度に抑えなければならない。

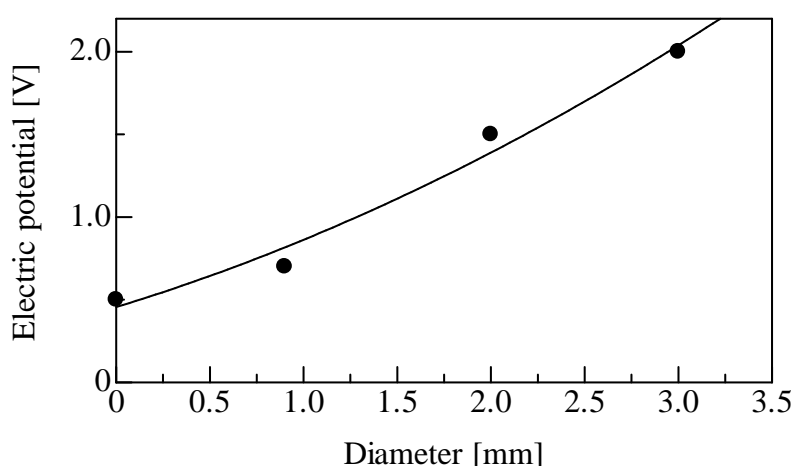


Fig. 4.11 Relationship between diameter of interruptsticks and electric potential

Fig. 4.11 を見るとインタラプトスティックの直径が $\phi 3.0$ mm のときとインタラプトスティックがないときの電位はそれぞれ 2.0 と 0.5 で電位差が 1.5 であることが分かる。この電位差から、規定流量よりも 10 % 電位が低下したときの電位を求めると 1.85 となる。電位 1.85 のときのインタラプトスティックの直径を求めると、直径が $\phi 2.7$ mm である。この結果から、直径 $\phi 3.0$ mm のインタラプトスティックは、硬質の粒子が衝突することにより摩耗しても直径が $\phi 2.7$ mm まで使用可能であることが分かった。

4.5.2 長期使用における影響

センサーの噴射検出性能における増粘着材噴射によるアブレイブ摩耗の影響を調べるために、耐久性試験を行う前の初期の供試体と積算噴射量が 15 年相当量のときの供試体において増粘着材噴射をそれぞれ 1 回行い、噴射流量をセンサーで測定した。測定結果を Fig. 4.12 に示す。Fig. 4.12 (a) は初期の結果で、Fig. 4.12 (b) は積算噴射量が 15 年相当量のときの結果である。

Fig. 4.12 (a) と Fig. 4.12 (b) のどちらも、センサーの電圧波形は増粘着材噴射装置の噴射特性である 2 つのピークと安定領域を有する同様の形状を示し、検出電圧は共にほぼ 2.0 V であった。この結果より、増粘着材噴射による検出感度の経時変化はほとんど認められず、長期間に渡って利用可能であることが示された。

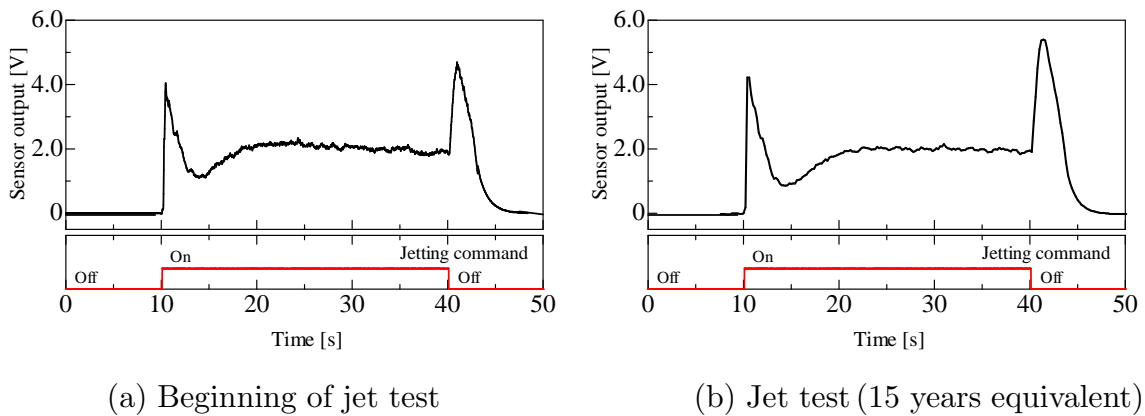


Fig. 4.12 Comparison of waveform (single jet)

次に、増粘着材噴射を繰り返し行ったときにセンサーで測定した電圧波形に再現性が認められるかどうかを検証した。初期の供試体と積算噴射量が 15 年相当量のとときの供試体において増粘着材噴射を 10 回繰り返し行い、そのときの噴射流量をセンサーで測定した。測定結果を Fig. 4.13 に示す。

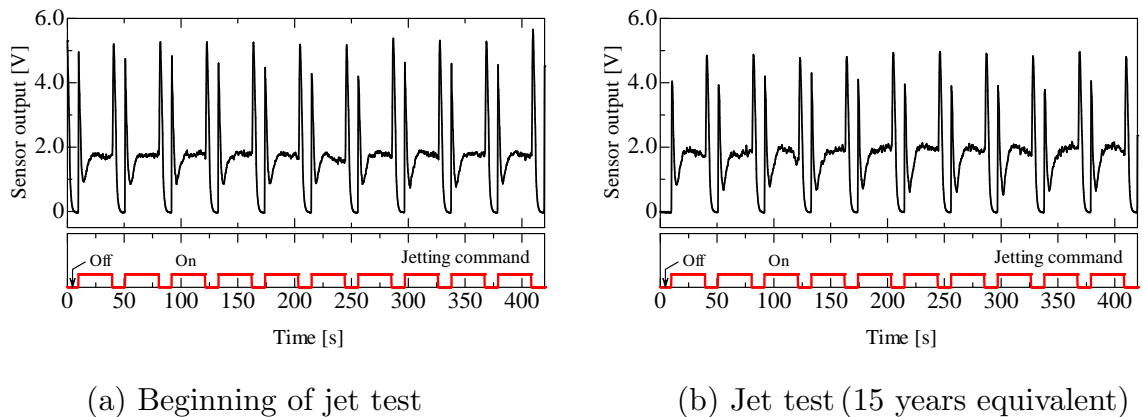


Fig. 4.13 Comparison of waveform (repeated jets)

Fig. 4.13 (a) は初期の結果、Fig. 4.13 (b) は積算噴射量が 15 年相当量のとときの結果である。初期の結果と積算噴射量が 15 年相当量のとときの結果を比較すると、どちらの電圧波形も増粘着材噴射装置の噴射特性である 2 つのピークと安定領域を有する同様の波形を示し、同一条件の隣り合う波形では検出電圧もほぼ同じレベルを維持している。Fig. 4.13 (a), (b) の安定領域での検出電圧を比較すると、それぞれ約 1.8 V と 2.0 V で検出電圧には 10 % 程の差がある。本研究で用いた実験装置はコンプレッサーの空気圧力で増粘着材を噴射しており、コンプレッ

サーに蓄えられた圧縮空気の圧力変動のため、噴射流量は± 20 % 程度変動する。そして、噴射流量の変動に伴い検出電圧も変動する。Fig. 4.13 (a), (b) の電圧差は、このコンプレッサーの圧力変動に起因するものと考えられる。

センサーの噴射検出性能は、増粘着材噴射を 15 年相当量まで行っても試験の初期のときの噴射波形と同様に 2 つのピークと安定領域を含んだ噴射波形である。また、噴射検出性能が低下したとは認められないことから、検出管およびアイソレータはアブレシブ摩耗による影響をほとんど受けないと結論づけられる。

4.6 結言

管内を流れるセラミックス粒子の流量を計測可能な静電気式粉体流量センサーの長期耐久性および信頼性を検証した結果、以下の結論を得た。

- 1) 検出管およびアイソレータの試験初期と積算噴射量が 15 年相当量とのときの表面粗さの差は約 $1\sim 2\mu\text{m}$ と小さく、20 年相当量とのときの質量の減量が総質量に対して約 0.38 % 以下、単位表面積当たりでは約 0.19 mg/mm^2 以下であることから、増粘着材のアブレシブ摩耗による検出管とアイソレータへの影響は少ないと考えられる。
- 2) 増粘着材噴射前と積算噴射量が 15 年相当量とのときの検出管およびアイソレータについて表面観察と粗さ測定を行ったが、表面状態に顕著な変化は見られなかった。
- 3) センサーの検出感度とインタラプトスティックの直径の大きさは相関関係があり、材質がステンレス (SUS304) 製のものはアブレシブ摩耗に対してほとんど摩耗することがなく有効である。
- 4) センサーの噴射検出性能は、積算噴射量が 15 年相当量まで増粘着材噴射を行っても増粘着材噴射を行っていないときと同等で噴射検出性能の低下はほとんど認められない。
- 5) センサーの耐摩耗性と噴射検出性能を検証した結果、本センサーは 20 年相当までの長期に渡る使用が可能であり、検出管とアイソレータにおいて増粘着材による摩耗が少ないことから、管厚を薄くすることによりセンサーの小型軽量化が可能である。

参考文献

- 1) Nagase, K., Y. Wakabayashi, J. Hiramata, A. Ohira and N. Tanabe; "A Study on the Wheel Skidding of JR Ltd Express EMUs (1st Report, Factors Influence upon the Wheel Skidding)," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **70**, 689, 149-157 (2002)
- 2) Koresawa, M., H. Koizumi, M. Tomeoka, M. Tanimoto and Y. Oka; "Wheel Slipping Experiment using Practical Car on Actual Track (Characteristics of Pre-Slipping Phenomenon)," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **67**, 653, 67-72 (2001)
- 3) Dowson, D.; History of Tribology, 1st ed., pp. 261-263, Longman Inc., New York (1979)
- 4) Mei, T., X.; "A Mechatronic Approach for Anti-slip Control in Railway Traction," *Proceedings of the 17th World Congress 2008*, Seoul, Korea, 6-11 July, 8275-8279 (2008)
- 5) 渡邊朝紀; "新幹線高速化のための粘着力利用技術 (2) インバータ制御時代の空転・滑走再粘着制御," *JREA*, **37**, 11, 12-14 (1994)
- 6) Kumagai, N., I. Hasegawa and K. Kawaguchi, "A Study on Mechanisms of Wheel Flat Occurrence and Wheel Skid," *Quarterly Report of RTRI*, **34**, 2, 103-110 (1993)
- 7) 新井浩, 菅野悟, 柳瀬直仁; "新幹線高速化のブレーキシステムについて," *JR EAST Technical Review*, **22**, 11-14 (2010)
- 8) Sackfield, A., D. Dini and D. A. Hills; "Contact of a rotating wheel with a flat," *International Journal of Solids and Structures*, **44**, 3304-3316 (2007)
- 9) Arias-Cuevas, O., Z. Li, R. Lewis and E. A. Gallardo-Hernandez; "Rolling-Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Dry and Wet Wheel-Rail Contacts," *Wear*, **268**, 543-551 (2010)
- 10) 日野良英, 電車「車輪フラットの現状と対策 国鉄の在来線電車」, **4**, 379, pp. 26-30, 交友社 (1987)

- 11) Ohno, K., T. Ban, T. Obara and K. Kawaguchi; "Adhesion Improvement with Jetting Ceramics Particles in High Speed Running," *Quarterly Report of RTRI*, **35**, 4, 218-220 (1994)
- 12) 大野薫, 伴 巧, 具嶋和也, 大江晋太郎, 本多康祐; "増粘着材噴射の車輪滑走・フラット防止への適用", *Railway Research Review*, **59**, 4, 10-13 (2002)
- 13) Masuda, H., S. Matsusaka and H. Shimomura; "Measurement of Mass Flow Rate of Polymer Powder Based on Static Electrification of Particles," *Advanced Powder Technol., Japan*, **9**, 2, 169-179 (1998)
- 14) Matsusaka, S., Maruyama, H., Matsuyama, T. and Ghadiri, M.; "Triboelectric Charging of Powders: A Review," *Chemical Engineering Science*, **65**, 5781-5807 (2010)
- 15) 第 46 回粉体工学研究講習会, 粉体の静電気帯電・付着のメカニズムと制御・評価法, pp. 1-9, 粉体工学会 (1999)
- 16) 具嶋和也, 伴巧, 坂本博, 大野薫, 本多康祐, 時田実, 齋藤和男; "管内の固気二相流における粉体粒子の流量計測", *Proceedings of Dynamics & Design Conference*, 日本機械学会, DVD, 538 (2003).
- 17) Cenna, A. A., N. W. Page, K. C. Williams and M. G. Jones; "Wear mechanisms in dense phase pneumatic conveying of alumina," *Wear*, **264**, 905-913 (2008)
- 18) Okazaki, S., K. Hasegawa, M. Takamori and M. Kiyoshige; "Wear of Materials by Sand Erosion and Estimation of Wear Loss," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, **56**, 527, 1668-1671 (1990)
- 19) Hutchings, I. M.; "Abrasion Processes in wear and manufacturing," *Journal of Engineering Tribology Part J*, **216**, 55-61 (2002)
- 20) Bermúdez, M., F. J. Carrión, G. Martinez-Nicolás and R. López; "Erosion-Corrosion of Stainless Steels, Titanium, Tantalum and Zirconium," *Wear*, **258**, 693-700 (2005)
- 21) Buckly, D. H., Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication, 1st ed., pp. 469-484, Elsevier. Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands (1978)
- 22) Neale, M. J., Tribology Handbook, 1st ed., pp. A53, Butterworths &

Co(Publishers) Ltd., London (1973)

- 23) 南茂夫, 木村一郎, 荒木勉, はじめての計測工学, 第 1 版, pp. 77-79, 講談社 (2005)
- 24) Stachowiak, G. W., A. W. Batchelor, Engineering Tribology, 2nd ed., pp. 484-509, Butterworth-Heinemann, Boston (2001)
- 25) Horst, C., Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, 1st ed., pp. 113-118, Elsevier. Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands (1978)

第 5 章

静電気式粉体流量センサーの鉄道車両への適用

5.1 緒言

東海道・山陽区間を高速で走行する 500 系あるいは 700 系新幹線電車のブレーキには、ABS が採用されており、湿潤時の滑走防止に威力を発揮している^{1), 2)}。新幹線には、この他に非常ブレーキ時に滑走の防止を行い、ブレーキ距離を短縮することを目的^{3), 4)}とした増粘着材噴射装置が搭載されている。本装置は、少量の増粘着材（アルミナ粒子）を約 100 m/s の高速で噴射するため、車両走行時の走行風の影響を受けることなく、車輪とレールの間に正確に増粘着材を供給することができる。これにより高速域での車輪とレールの間の粘着性を確保する⁵⁾ことが可能となり、湿潤条件下においても速度 300 km/h で非常ブレーキを掛けたときのブレーキ距離を 1000 m 前後短縮できることが示されている。近年、国内では車両の高速化が進められており、在来線電車でも速度 160 km/h 以上での営業運転を目指した次世代車両の開発が行われている。こうした鉄道車両の高速化には、ブレーキシステムの開発が不可欠であり、ブレーキ力を制御する研究や開発が進められてきた^{6), 7), 8)}。在来線の電車では、ブレーキ距離が 600 m 以下となることが法令で定められている⁹⁾ことから、増粘着材噴射装置は新幹線電車ばかりでなく、ローカル線を走行する気動車から機関車、通勤電車などでも採用され、在来線の高速化において重要な役割を担っている。停車した車両が起動するときや走行車両が加速する際に、降雨や落ち葉により車輪とレールとの間の粘着力が低下^{10), 11)}していると車輪が空転する。増粘着材噴射装置は、このような車輪の空転防止用としても用いられている。砂まき装置の代替として用いられる場合、機関車の砂まき装置で使用する砂の約 1/30 以下の量の増粘着材で同等の効果が得られることから、砂の補給周期を長くすることが可能となり、ランニングコストの

低減にも役立っている。

増粘着材噴射装置は高い機能性と信頼性を有した装置として、これまで鉄道車両で使用されてきた。新幹線電車については速度 360 km/h での営業運転を目指した次世代車両の開発が行われている。新幹線電車では、在来線の電車ようにブレーキ距離に関する法的な規制はないが、緊急時に非常ブレーキと併用して使用されるため、本装置が確実に動作することを保証することは乗客の安全を確保する上で不可欠である。そこで、これまで以上に信頼性が求められる次世代車両で使用される増粘着材噴射装置の動作を保証するためのモニタリングシステムの開発に取り組んできた。増粘着材噴射装置におけるセラミックスの噴射をモニタリングできれば、増粘着材噴射装置が作動していないことを検知した場合に予備の増粘着材噴射装置を作動させることで噴射量の確保、装置の動作保証が可能となる。モニタリングシステムを構成する装置の中で最も重要なセンシング部分である、管路内を通過する増粘着材の流れを検出するセンサー部について、静電容量や衝撃などによる検出手法を検討し、静電気による測定法が有効であることを確認した。第 2 章から第 4 章では、ベンチ試験により静電気式粉体流量センサーの噴射検出に関する基本性能、振動条件下での性能、長期間の使用を想定した耐久性について、それぞれ評価を行なった。

本センサーを鉄道車両の増粘着材噴射装置のモニタリングシステムの一部として使用する場合、実際の走行条件下でも安定して増粘着材の噴射の有無が検出可能なことを確認する必要がある。本章では実車による走行試験を行い、車両走行時の振動条件下でのセンサーの検出性能を検証した。

5.2 実験装置および試験方法

5.2.1 実験装置

噴射する増粘着材にはアルミナ（質量中位径 0.3 mm）を、また増粘着材噴射タンク（以下、セラジェットタンクと呼ぶ）と静電気式粉体流量センサーを繋ぐ輸送管には穴径 $\phi 12$ mm の高圧用合成ゴムホースを使用した。本研究の走行試験で使用了装置の概要を Fig. 5.1 に示す。

鉄道車両は、車体と車体を支持し走行するための台車からなる。この台車の雪かき装置（以下、スノープラウと呼ぶ）部分にセラジェットタンクと輸送管および噴射ノズルで構成されている増粘着材噴射装置、管路内を通過する増粘着材を検

出する静電気式センサー，車両走行時の静電気式センサー（以下，センサーと呼ぶ）の振動を測定するために振動加速度計を取り付けた．振動加速度は，前後，左右，上下の 3 方向について測定した．車両に固定したセンサーおよび取り付けた増粘着材噴射装置を Fig. 5.2 に示す．

センサーおよび振動加速度計は固定位置の違いによる振動の影響を調べるために，車両の進行方向から見て先頭車両の台車の前部に取り付けられているスノープラウの正面中央あるいは側面のセラジェットタンク下部近傍に固定した．このときのセラジェットタンクとセンサーの間に接続した輸送管の長さは，それぞれスノープラウ正面で約 2.0 m，側面で約 0.2 m であった．これ以後，スノープラウ正面および側面に固定したセンサーの位置をそれぞれ，設置点 A，設置点 B とする．車上の客室内には，センサーで検出した静電気（電流）信号を I-V 変換するアンプ，計測データ記録用のデータレコーダ，車両の滑走条件あるいは設定した走行速度条件を満たした場合に，増粘着材を自動で噴射する滑走検知・増粘着材噴射制御装置および速度検知・増粘着材噴射制御装置（以下，噴射制御装置と呼ぶ）を設置した．増粘着材噴射に必要なコンプレッサーと空気タンクは，車体床下に概設のコンプレッサーと空気だめを使用した．

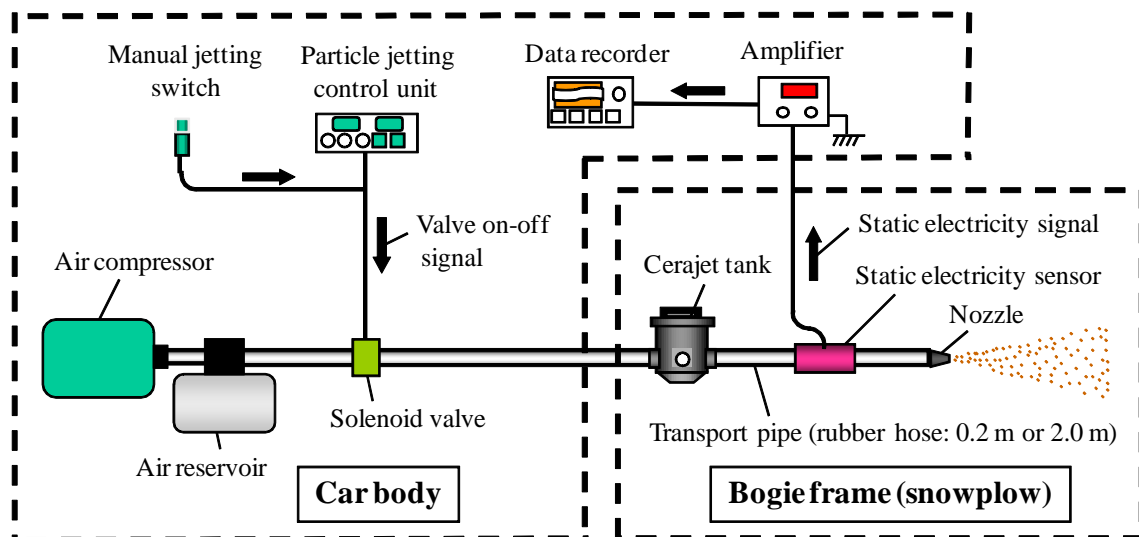
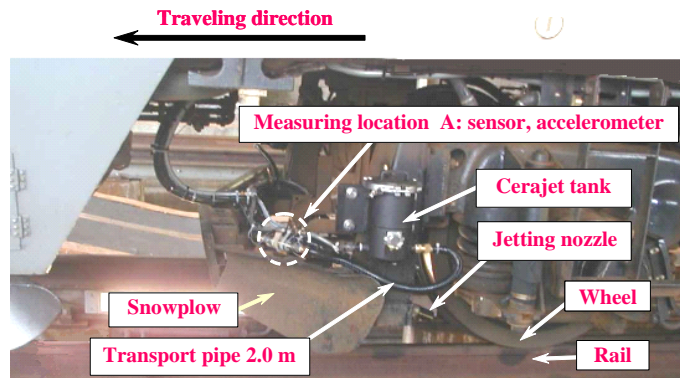
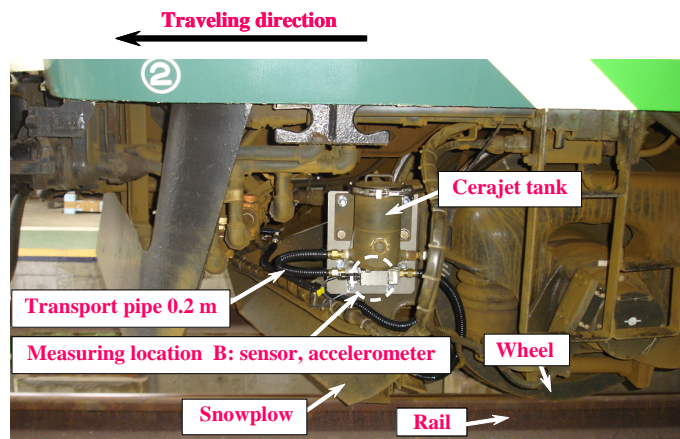


Fig. 5.1 Structure of particle sensing system



(a) Installed at the center of the snowplow



(b) Installed at the side of the snowplow

Fig. 5.2 Location of the sensor for test vehicles

5.2.2 試験方法

増粘着材の噴射は、手動動作あるいは噴射制御装置により自動で行った。増粘着材の噴射からセンサーでの噴射を計測するまでの手順について説明する。試験は湿潤条件と乾燥条件で行い、湿潤条件では先頭第 1 軸の直前に取り付けられた散水ノズルから第 1 軸前方のレール頭頂部に向けて散水量 $6.7 \times 10^{-2} \text{ l/s}$ で散水を行った。手動動作あるいは噴射制御装置により噴射指令 (信号) が電磁弁に送られると、空気だめの圧縮空気 (0.8~0.9 MPa) は管路内を經由し、セラジェットタンク内に入る。タンク内は圧縮空気により加圧され、空気と共に増粘着材は固気二相流の状態で輸送管そしてセンサーへと流れてノズル先端部の直径 $\phi 2.5 \text{ mm}$ の穴から噴射される。増粘着材には質量中位径が 0.3 mm のアルミナを、またセラジェットタンクにはタンク内の有効容積が 1.0 l の T10 型タンクを使用する。増

粘着材は輸送管内を通過するときに管壁と衝突を繰り返すため帯電する．この帯電粒子がセンサー壁およびインタラプトスティックと衝突して放電した増粘着材の電荷（微小電流）をセンサーで検出した．検出した電流は，電流値に比例した電圧値が得られることから I-V 変換アンプ（三協パイオテク（株）製，ESA-11 型）により電圧に変換した．そして，I-V 変換した電圧をデータレコーダで測定した．走行試験は，新潟・JR 信越本線（越後石山～東三条間 36.0 km）において，在来線特急形車両（6 両編成）あるいは近郊形車両（8 両編成）を用いて 3 回実施した．増粘着材を噴射する際の輸送管内の空気圧力はゲージ圧で 0.8～0.9 MPa，測定した電流の電流-電圧変換比は $\pm 1.0 \times 10^9 \text{ V/A}$ とした．すなわち，発生電流が $\pm 1.0 \times 10^{-9} \text{ A}$ のとき対応する検出電圧は $\pm 1.0 \text{ V}$ となる．実験条件を Table 5.1 に示す．

Table 5.1 Experimental conditions

Test vehicle	Limited express, suburban
Running velocity [km/h]	0 ~ 115
Installed location of sensor	Snowplow (center, side)
Number of interrupt sticks	0 or 4
Particle jetting time [s]	3.0 ~ 15.0
Particle flow rate [g/s]	0.7
Air pressure at air compressor [MPa]	0.8 ~ 0.9

5.3 実車両でのセンサーの噴射検出性能評価

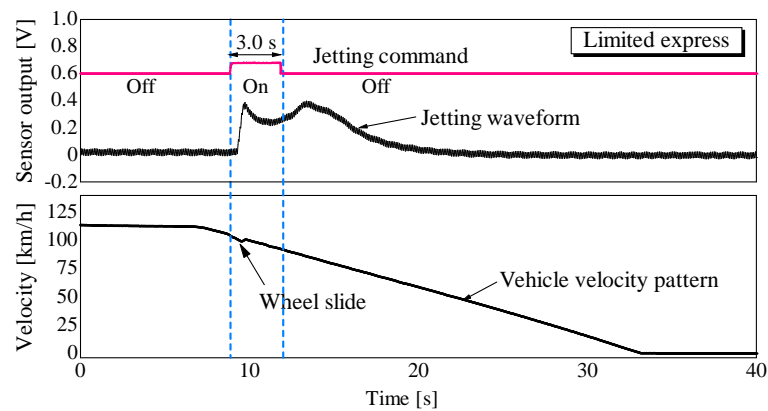
第 2 章において，提案したセンサーを用いることにより，装置が静止状態では粒子の流れを再現性よく検出できることを示した．しかしながら，このセンサーが実際に使われる状況では，センサー自体は様々な振動の影響を受ける．よって，提案したセンサーを実際に使えるものにするためには，粉体粒子が管内壁と衝突する回数や衝突時の電荷の移動量^{12), 13)}が振動によりどの程度影響を受けるかを明確にしておく必要がある．第 3 章において，加振機にセンサーを取り付けて振動させた状態¹⁴⁾で増粘着材の噴射性能を確認するベンチ試験について検討した．そこでは，振動加速度が増加すると検出した電圧も増加する傾向を示すという結果を得ている．第 3 章の結果をふまえ，本章では実際に車両に増粘着材噴射装置と提案したセンサーを設置し，振動が計測精度に与える影響を考察した．

5.3.1 走行試験による増粘着材の噴射測定

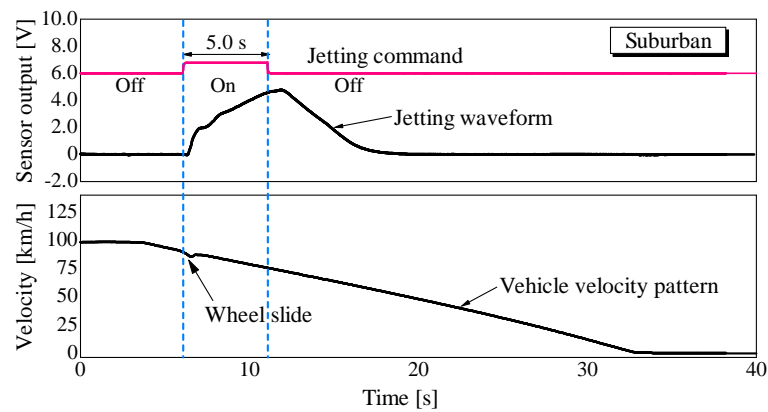
走行車両においてブレーキを掛け、自動あるいは手動で増粘着材の噴射を行い、噴射の有無をセンサーで検出する試験を行った。増粘着材の噴射流量はセラジェットタンク内に取り付けられているニードル弁を動かしてタンク内の加圧量を調整することにより、通常使用量と同程度の 0.7 g/s に設定した。センサーで測定した電圧波形と走行速度の変化を Fig. 5.3 に示す。図中の走行速度は車輪の回転から求めた速度であり、以後それを走行速度と呼ぶ。Fig. 5.3 (a), (b) と (c) は、それぞれ湿潤条件と乾燥条件のときの試験結果で、湿潤条件ではブレーキを作動させる 4 km 手前の地点から車両が停止するまで散水を行った。

Fig. 5.3 (a) は特急形車両において速度約 110 km/h 、Fig. 5.3 (b), (c) は近郊形車両においてそれぞれ速度約 100 km/h あるいは約 60 km/h からブレーキを掛けた結果である。速度が 100 km/h 以上である Fig. 5.3 (a), (b) の走行速度を見ると、噴射指令の開始後に速度が急激に低下したことを示す凹んだ部分がある。この走行速度が急激に低下した箇所は、車輪とレールの粘着力が低下し滑走が発生したため、走行速度が一時的に低下したことを示すものである。急激な速度低下後に走行速度が上昇した箇所は、増粘着材の噴射により車輪とレールの粘着力が回復し、走行速度が車両の実際の速度に戻ったことを示す。そして、それ以後走行速度に急激な変動はなく直線的に減速している。

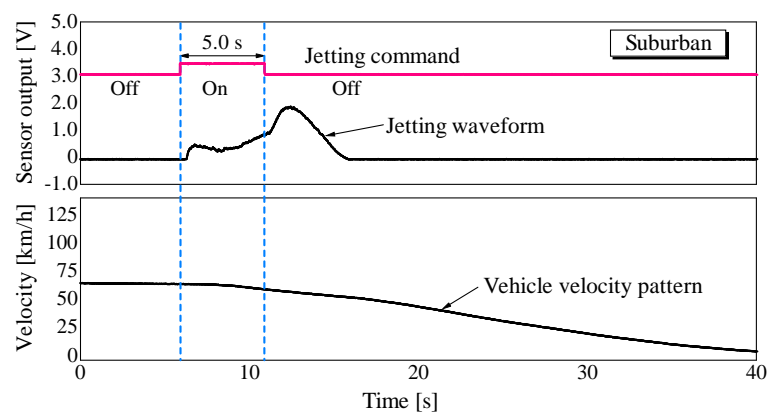
Fig. 5.3 (a)~(c) にはそれぞれ噴射指令開始後に噴射を開始したことを示す電圧の上昇が現れていることから、センサーで増粘着材の噴射を検出できていることが分かる。Fig. 5.3 の電圧の波形を見ると最初に小さなピークが現れ、一旦下がりその次に大きなピークがある。増粘着材を噴射すると、噴射が終了するごとに輸送管内やセンサー内に増粘着材がその都度残存する。最初のピークは輸送管あるいはセンサー内に残存していた増粘着材をセンサーで検出したピークであり、その次の大きなピークはセラジェットタンク内から噴射された測定すべき波形と考えられる。センサーで測定した電圧波形の形状はそれぞれ異なっている。このように同一の噴射流量で測定した結果であるにも関わらず、検出した電圧波形の形状や電圧の大きさが異なっているのは、輸送管の長さや経路形状、検出管内のインタラプトスティックの有無による構造の違いが影響しているものと考えられる。また、噴射指令の開始から電圧波形が立ち上がるまでの時間差は、電磁弁が作動してからセラジェットタンク内の増粘着材が空気と共に輸送管内を流れてセンサーに到達するまでの時間に相当すると考えられる。噴射指令が終了しても電圧は直ぐには下がらず、電圧は増加を続けて数秒後に電圧が減少している。



(a) Measuring location A (No interrupt stick)



(b) Measuring location A (4 interrupt sticks)



(c) Measuring location B (4 interrupt sticks)

Fig. 5.3 Responses of particle sensors and velocities of vehicles

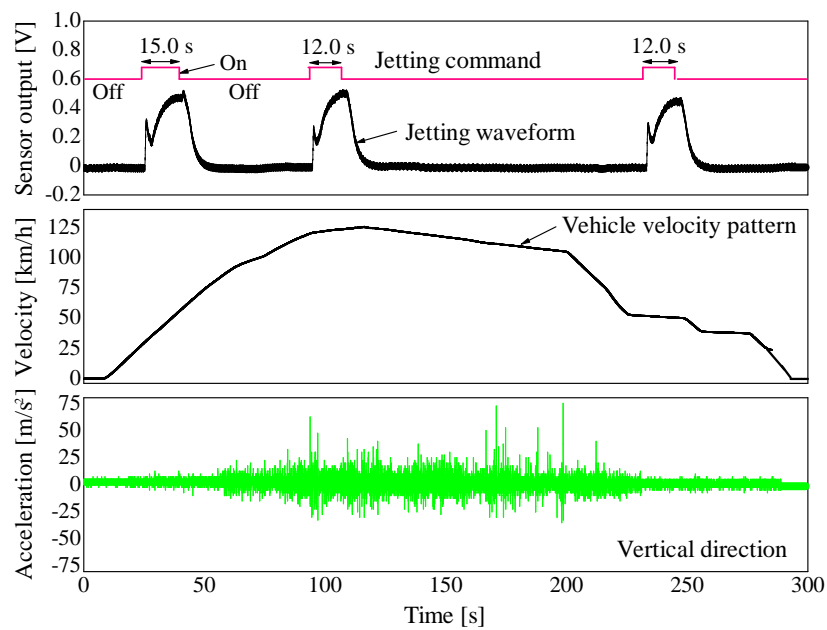
これは増粘着材噴射装置の構造的な特性による。噴射指令が終了すると電磁弁が閉じてコンプレッサーからセラジェットタンクに空気の供給が遮断される。しかし、Fig. 5.1 の構造から分かるように、噴射指令終了直後のセラジェットタンク内には加圧空気が残存しており、この空気圧により増粘着材の噴射はタンク内が常圧になるまで継続される。

Fig. 5.3 (a) と (b) はインタラプトスティックを取り付けた条件で、Fig. 5.3 (c) は取り付けしていない条件であるが、どちらの場合も増粘着材の噴射を検出することが可能であった。また、輸送管の長さが異なる設定点 A と設定点 B で試験を行なった結果では、輸送管が短い条件に比べて長い条件の方が検出電圧が大きくなった。これは、輸送管の長さが増加することにより、管内で衝突する粉体粒子の回数が増加した結果、粉体粒子の帯電量が増加したことによるものと推測される。Fig. 5.3 (a)～(c) の結果から、センサーの取り付け条件やインタラプトスティックの有無により、電圧波形が異なっているが、噴射の有無を検出する目的で使用する場合には問題とはならないことが明らかになった。

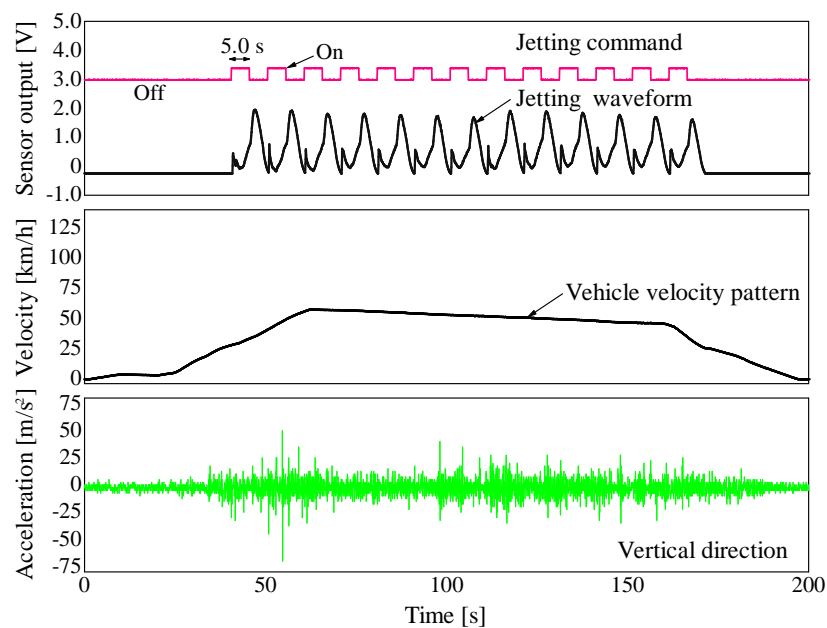
5.3.2 振動の電圧波形への影響

特急形車両および近郊形車両において、停止-走行-停止の一走行を行い、この走行区間内で数回増粘着材を噴射し、測定した電圧波形の再現性を検証した。電圧の測定結果、およびセンサー部の振動を測定した結果を Fig. 5.4 に示す。Fig. 5.4 (a) は設置点 A、Fig. 5.4 (b) は設置点 B での測定結果である。

Fig. 5.4 (a) の噴射測定では、走行速度が変わり振動の大きさが異なっても、センサーの出力である電圧波形の形状や大きさはほぼ同一であった。Fig. 5.4 (b) では、連続的に噴射を行ったにも関わらず、電圧波形の形状や大きさにほとんど違いは見られなかった。車両形式や速度、あるいはセンサーの取り付け位置が異なる条件での測定結果において、再現性があることから、走行速度の差による振動の違いが本センサーの計測性能に与える影響は小さいことが分かった。



(a) Measuring location A (limited express)



(b) Measuring location B (suburban)

Fig. 5.4 Effect of vehicle velocity to the output of the sensor

5.3.3 停車車両および走行車両における増粘着材噴射の比較

前節では、走行車両において走行中にブレーキを掛けて増粘着材噴射を行い、そのときの噴射状態をセンサーで測定した結果について説明した。本節では、走行時と全く振動のない停車時のセンサーの噴射検出性能の差について検討する。対象は設置点 A と設置点 B の位置にセンサーを配置した近郊型車両を用い、一定速度 (90 km/s) での走行時と停車した状態において噴射量 0.7 g/s で増粘着材噴射を行い、電圧波形を測定した。

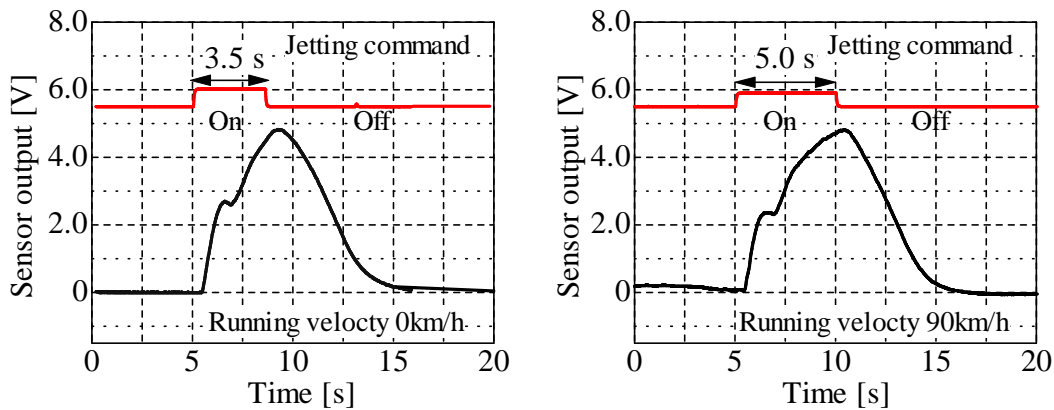
Fig. 5.5 (a), (b) は、設置点 A と B の位置での、走行時と停車時の測定結果である。設置点による差は顕著であるが、それぞれの設置点での走行時と停車時の電圧波形の大きさおよび形状に大きな差はなかった。

Fig. 5.5 (a) と (b) では、噴射指令開始により電磁弁が開いてから電圧波形が立ち上がるまでの噴射開始時間、あるいは電圧波形の形状が異なっている。これは、車両の空気だめからセラジェットタンクまでの配管の長さや、電磁弁の設置箇所が影響しているものと考えられる。空気だめとセラジェットタンクを繋ぐ空気配管が長く、電磁弁を空気だめの近傍に設置した場合、電磁弁とセラジェットタンクを繋ぐ空気配管の長さが、電磁弁と空気だめを繋ぐ空気配管の長さに比べて長くなる。そのため、噴射指令開始から増粘着材噴射による電圧波形が立ち上がるまでの噴射開始時間が増加するものと考えられる。

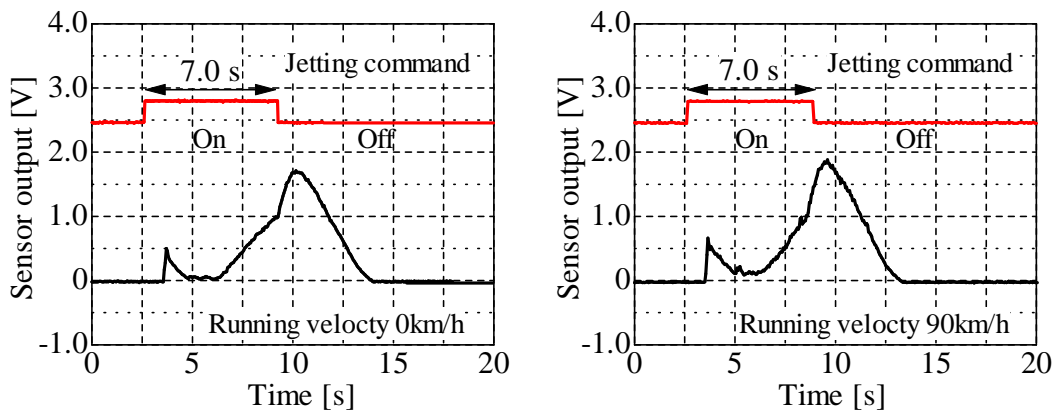
これは、噴射指令の開始からセラジェットタンクに空気が入り始めるまでの時間や、タンク内の圧力が飽和するまでの時間、また噴射が実行されるまでに要する時間が増加することを意味する。

Fig. 5.5 (b) の噴射指令後の小さなピークは前回の噴射のときにセラジェットタンクとノズルの間の輸送管に残留したもので、次に現れる大きなピーク波形はセラジェットタンク内から噴射されたときのものである。また、大きなピークは噴射指令後から波形が立ち上がるまでに約 3.5 s 掛っており、Fig. 5.5 (a) の約 0.5 s と比べると波形が立ち上がるまでの時間が約 7 倍である。

空気配管は車両に固有なものであり、長さは車両毎に異なる。このような波形になることを回避するには、空気だめとセラジェットタンクを繋ぐ空気配管の長さをできる限り短くし、電磁弁とタンクの間の空気配管の長さも短くすることが望ましいと考えられる。



(a) Measuring location A



(b) Measuring location B

Fig. 5.5 Comparison of output waveforms at stopping and running conditions
(suburban)

5.4 振動解析

第 3 章 3 節において示した，加振機にセンサーを取り付けて振動させた実験では，加速度振幅の上昇に伴い検出した電圧も上昇した (Fig. 3.4 参照)．この結果に対し，実際の車両を用いた実験ではその差は顕著でなかった．この点を検討するため，現実の車両での振動特性を調べた．実験には近郊型車両を用い，越後石山～羽生田 (走行区間 24.3 km) における走行試験時の設置点 A と B の位置に固定したセンサーの振動特性を振動加速度計を用いて測定した．結果を Table 5.2 に示す．

振動加速度の最大値は上下方向が最も大きく、全方向での最大値は $36 \text{ m/s}^2 \sim 112 \text{ m/s}^2$ であった。測定した振動は、非周期であるため振動量の 2 乗の時間的な平均値の平方根を表す実効値 (Root Mean Square; RMS) として求めた。その結果、振動加速度の実効値は $1.3 \text{ m/s}^2 \sim 5.2 \text{ m/s}^2$ であった。加振機にセンサーを取り付けて振動させた状態で増粘着材の噴射性能を確認するベンチ試験では、センサーは振動加速度 $100 \text{ m/s}^2 \sim 300 \text{ m/s}^2$ の範囲で正弦波で振動させていた。

Table 5.2 Maximum and root mean square of vibration acceleration of the sensors

Direction of acceleration	Measuring location A			Measuring location B		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Maximum	62	75	112	40	36	70
Root mean square	2.8	3.4	5.2	1.8	1.3	2.2

X: lateral, Y: longitudinal, Z: vertical unit: m/s^2

センサーの実車試験とベンチ試験での加速度の大きさを比較すると、加速度の大きさは約 20～230 倍の違いがある。実車試験の振動加速度は、ベンチ試験の加速度振幅に比べて加速度がかなり小さいことから、実車走行時に発生する振動加速度の大きさでは、センサーの噴射測定性能に影響をあまり与えないと推定される。

5.5 結言

本章では、鉄道車両に提案したセンサーを搭載して走行試験を行い、振動条件下でのセンサーの検出性能を検証した。その結果、本センサーは振動条件下でも噴射の検出が可能で、実車での使用が有効であることを確認した。

- 1) スノーブラウに固定したセンサーが走行時に受ける振動加速度の最大値は $36 \text{ m/s}^2 \sim 112 \text{ m/s}^2$ 、その実効値 (RMS) は $1.3 \text{ m/s}^2 \sim 5.2 \text{ m/s}^2$ であった。車両の走行速度 (振動条件) が異なる条件においても、上述した程度の振動加速度であれば、提案したセンサーによって得られた測定電圧波形は再現性があり、噴射を安定して検出できる。また、この電圧波形は車両停車時 (無

振動時) とほとんど同じである。

- 2) 提案したセンサーによる増粘着材噴射時に観測される電圧波形は、センサーの設置場所や配管形状の影響を受ける。輸送管の長さが異なるものを比較すると、輸送管が長いものの方が短いものに比べて検出電圧が大きくなった。しかしながら、どの設置場所でも噴射の検出は可能であり、モニタリングシステムを構成する装置として実用化が可能である。

参考文献

- 1) Nankyo, M. and S. Uchida; "Research of The Brake Control System for Advanced ATC System," *RTRI Report*, **14**, 5, 11-16 (2000)
- 2) Kawaguchi, K.; "The View and the Example of Pratical Use of the High Adhesion Brake System," *J-Rail*, 61-68 (2004)
- 3) Handoko, Y. and M. Dhanasekar; "Wheelset skid in railway bogies," *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. IMechE*, **221**, 237-245 (2007)
- 4) Mei, T. X., J. H. Yu and D. A. Wilson; "A Mechatronic Approach for Effective Wheel Slip Control in Railway Traction," *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. EMEchE.*, **223**, 295-304 (2009)
- 5) 大野薫, 伴巧, 具嶋和也, 大江晋太郎, 本多康祐; "増粘着材噴射の車輪滑走・フラット防止への適用," *Railway Research Review*, **59**, 4, 10-13 (2002)
- 6) Choi, J. J., S. H. Park and J. S. Kim; "Dynamic adhesion model and adaptive sliding mode brake control system for the railway rolling stocks," *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. EMEchE.*, **221**, 313-320 (2007)
- 7) 渡邊朝紀, 大江晋太郎, 川口清; "電気車の科学 マルチモードブレーキ滑走再粘着制御," *電気車研究舎*, **47**, 3, 39-43 (1994)
- 8) Moriyama, A., R. Shimamune, H. Nomoto, K. Kumabe, K. Takada, S. Ide and Y. Kamo; "Development of Total Skid Control System in Train," *J-Rail*, 197-198 (2004)
- 9) 運輸省鉄道局, 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 第 1 版, pp.

- 163-175, 研友社 (1993)
- 10) Broster, M., C. Pritchard and D. A. Smith; "Wheel / Rail Adhesion: Its Relation to Rail Contamination on British Railways," *Wear*, **29**, 309-321 (1974)
 - 11) Chen, H., T. Ban, M. Ishida and T. Tanaka; "Experimental Investigation of Influential Factors on Adhesion between Wheel and Rail under Wet Condition," *Wear*, **265**, 1504-1511 (2008)
 - 12) Matsusaka, S., M. Ghadiri and H. Masuda; "Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate," *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **33**, 2311-2319 (2000)
 - 13) Masuda, H., S. Matsusaka, S. Akiba and H. Shimomura; "Electrification of Fine Particles in Gas-Solids Pipe Flow," *KONA Powder and Particle*, **16**, 216-222 (1998)
 - 14) Ewins, D. J.; *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2nd ed., pp. 186-189, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England (1993)

第 6 章

滑走検知・制御システムによる滑走防止 効果の検証

6.1 緒言

降雨や降雪などの湿潤条件下を走行中の鉄道車両でブレーキを作動させると、車輪とレールの間に水が介在することにより粘着力が低下し^{1), 2), 3)}、車輪が滑走する^{4), 5), 6)}。滑走がさらに進展して車輪の回転が停止する固着状態に達すると、車輪踏面上にフラットと呼ばれる平坦な損傷ができる。このような車輪のフラットは、振動や騒音の発生源になると共に車両の乗り心地を低下させるため、回避する必要がある^{7), 8)}。

近年、鉄道車両の滑走を防止してフラットの発生を低減させるために滑走検知再粘着装置 (ABS) を装備した車両が増えつつある^{9), 10)}。しかしながら、現状において ABS を装備していない車両も多い。こうした車両にも ABS を導入することが望まれるが、これらの車両には廃車までの残り年数が短い旧型の車両が多く、改修費用や工期の点から ABS の導入が見送られている状況にある。

滑走を防止するもう一つの方法として、増粘着材噴射装置が用いられている。増粘着材噴射装置は、これまで ABS を搭載していない車両で滑走防止に使用されている¹¹⁾。しかし、そのような車両では、運転士が車両の滑走を感知して手動で増粘着材の噴射を行うため、噴射のタイミングを的確に捉えることが難しく、確実に滑走を防止することが困難であった。

この増粘着材噴射装置に着目し、自動で滑走検知を行う¹²⁾と共に増粘着材を噴射することで滑走防止を行う新しいシステムを開発した。開発したシステム (以下、本システムと呼ぶ) は、滑走検知ユニット (Wheel slide detection unit) および滑走制御ユニット (Wheel slide control unit) の 2 つのユニットで構成されている。滑走検知ユニットは、車両に既設の速度発電機を利用して滑走検知を行

うと共に増粘着材噴射装置に噴射指令を出力する機能を有している。滑走制御ユニットは、既存の増粘着材噴射装置と噴射状態検出装置からなり、増粘着材の噴射機能と検出機能を有している。鉄道車両の ABS では、複数の車輪の滑走を監視し^{13), 14)}、滑走した車輪のブレーキ力を制御することで滑走防止を行っている^{15), 16), 17), 18)}。一方、本システムは、車両に既設の速度発電機を用いて滑走検知を行うと共に先頭車両の 1 軸のみに増粘着材を噴射することで、全ての車輪の滑走を防止する。本システムは、ABS に比べて装置の構造が単純で小規模なシステムであることから、導入費用を ABS の 1/10 程度に抑えることができる。

本報では、ABS を装備していない車両に本システムを取り付けて湿潤条件下でブレーキ試験を行い、滑走防止効果を検証した。

6.2 滑走検知・制御システムの概要

鉄道車両では、Fig. 6.1 に示すように編成先頭台車の第 1 軸、第 2 軸に速度発電機 (速度センサー) が設置されている。速度発電機は、車輪の回転数に比例したパルス信号を発生させる装置で、車両速度の計測に用いられている¹⁹⁾。本システムでは、速度発電機のパルス信号を用いて滑走検知を行い、その滑走検知に連動した増粘着材噴射により滑走を防止する。

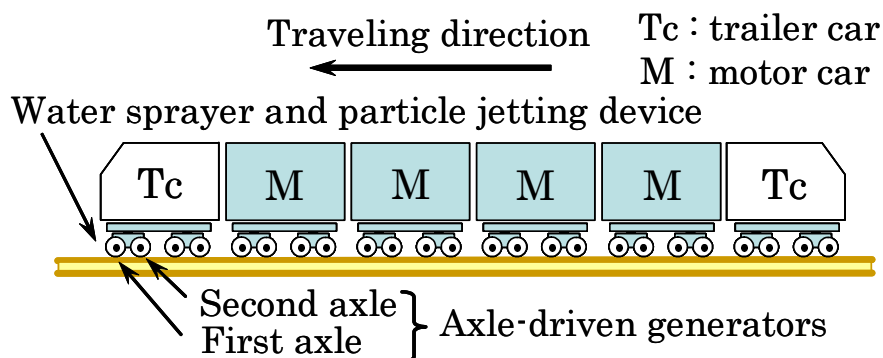


Fig. 6.1 Location of axle-driven generators

さらに、増粘着材噴射の有無を噴射状態検出装置 (Particle jetting detection apparatus) で判定する。本システムの概略を Fig. 6.2 に示す。鉄道車両は、車体および車体を支持し走行するための台車で構成されている。車体の客室内には、車輪の滑走を検知すると共に増粘着材噴射装置に増粘着材の噴射指令を送る滑走

検知・増粘着材噴射指令出力装置 (Wheel slide detection and particle jetting output apparatus) と計測制御用 PC(以下, PC と呼ぶ) を設置した。

車体の床下には増粘着材噴射用の電磁弁を設置し, 増粘着材の噴射に必要なコンプレッサーと空気タンクは床下に既設のコンプレッサーと空気だめを使用した。

先頭車両の台車には, 雪かき装置 (以下, スノープラウと呼ぶ) が取り付けられている。このスノープラウの左右両側にタンク内の有効容積が 1.0 l の T10 型の増粘着材噴射タンク (以下, セラジェットタンクと呼ぶ) と輸送管および噴射ノズルからなる増粘着材噴射装置をそれぞれ 1 台取り付けした。使用する増粘着材の材質は, アルミナ (質量中位径 0.3 mm) である。増粘着材の管路内の通過を検出する静電気式粉体流量センサーは増粘着材噴射装置の片側一方だけに取り付け, スノープラウの正面 (中央) に固定した。また, 静電気式粉体流量センサーで測定した信号を電圧に変換する I-V 変換アンプ (三協パイオテク (株) 製, ERV-121), 計測データ記録用のデータレコーダは客室内に設置した。

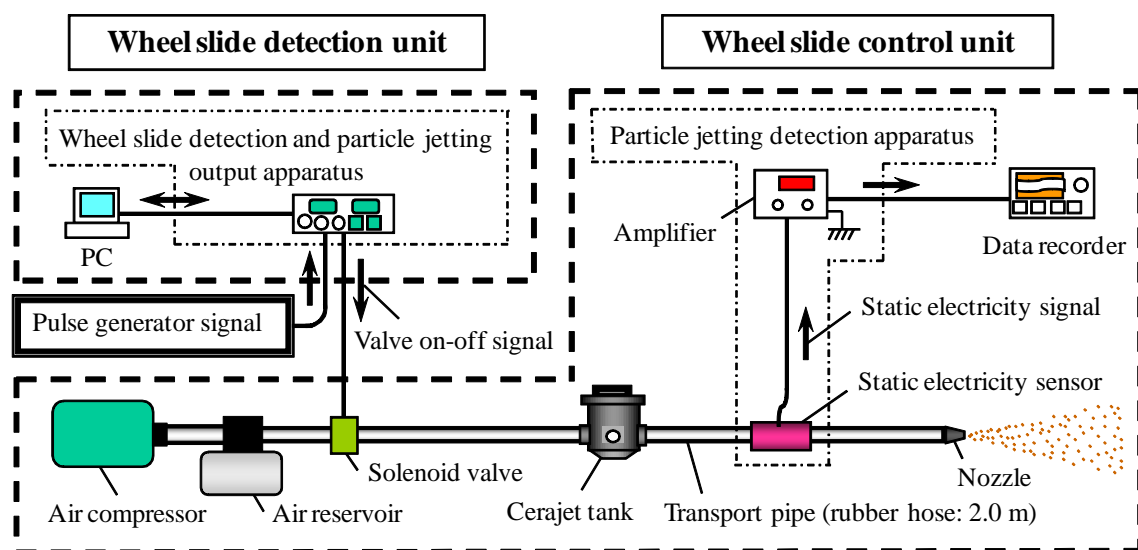


Fig. 6.2 Structure of wheel slide detection and control system

6.3 滑走検知ユニット

6.3.1 滑走検知法

車輪の滑走を検知する方法には、滑走を軸速度の変化量の大きさに検知する減速度検知と、異なる 2 軸の速度の差を比較する速度差検知の 2 通りがある^{18), 20)}。減速度と軸速度差の滑走検知方法の原理について説明する¹³⁾。

車両速度（以下、軸速度と呼ぶ）の算出には、車輪の回転によって発生する速度発電機のパルス信号が用いられている。車輪径 D [m]，速度発電機から出力される回転パルスの周波数 F [Hz]，速度発電機の一回転当りのパルス数 P を用いると、車両の軸速度 V [m/s] は Eq. (6.1) で表せる。

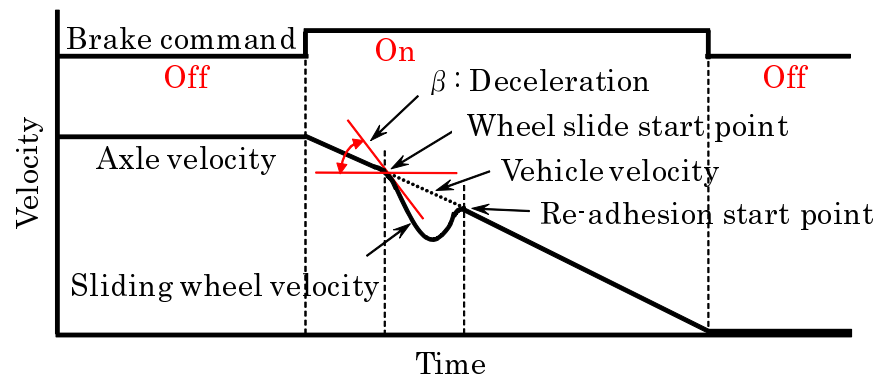
$$V = 3.14 \times DF / P \quad (6.1)$$

次に、Fig. 6.1 に示す車両が走行中にブレーキを掛けたときの車両の減速度を求める。減速度 β [m/s²] は、測定した軸速度を $V(t)$ [m/s]，この軸速度 $V(t)$ よりも時間 Δt [s] だけ経過したときの軸速度を $V(t + \Delta t)$ [m/s] とすると Eq. (6.2) で表せる。

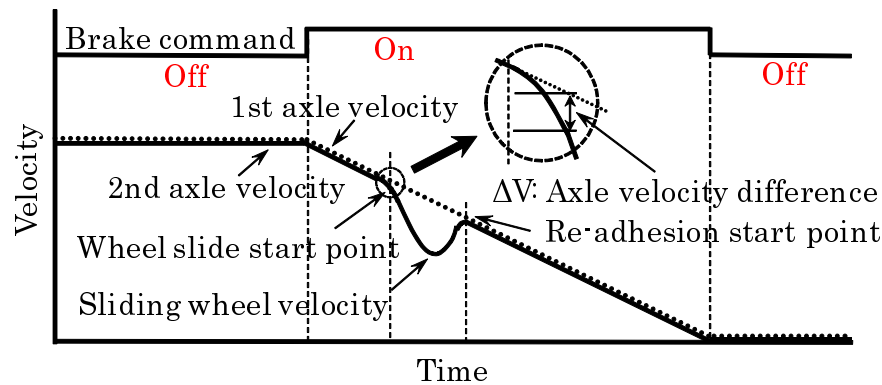
$$\beta = \{V(t) - V(t + \Delta t)\} / \Delta t \quad (6.2)$$

車両の第 1 軸と第 2 軸の軸速度を V_1, V_2 ，減速度を β_1, β_2 とすると、これらの値は Eq. (6.1), (6.2) に速度発電機で発生する回転パルスの周波数 F と軸速度 $V(t)$ ， $V(t + \Delta t)$ および時間 Δt を代入することにより求められる。

第 1 軸の軸速度 V_1 から第 2 軸の軸速度 V_2 を差し引くと、速度差 ΔV [m/s] が求められる。ここで、速度差 ΔV は絶対値とする。上記で求めた減速度 β および速度差 ΔV をそれぞれ減速度検知と速度差検知のパラメータとして使用する。減速度と軸速度差による滑走検知方法の概略を Fig. 6.3(a) と Fig. 6.3(b) にそれぞれ示す。測定する車両の減速度 β_1, β_2 および速度差 ΔV には、滑走を検知（判定）する基準としてしきい値をそれぞれ設定する。測定する減速度 β_1, β_2 のいずれか、あるいは速度差 ΔV の中の設定したしきい値を超えた時点で滑走と判定する。



(a) Deceleration detection



(b) Velocity difference detection

Fig. 6.3 Wheel slide detection methods

6.3.2 滑走検知ユニットの構成

滑走検知ユニットは、滑走検知・増粘着材噴射指令出力装置（(株) アイドニック製、SDC-710）と PC で構成されている。先頭台車第 1 軸および第 2 軸の車輪径の実測値、車輪 1 回転あたりに発生する速度発電機の回転パルス数の値はあらかじめ滑走検知・増粘着材噴射指令出力装置に入力されている。速度発電機の回転パルス信号を滑走検知・増粘着材噴射指令出力装置に取り込み、速度に変換する。この値をもとに車両の減速度 β_1, β_2 および速度差 ΔV を求め、 $25 \times 10^{-3} \text{ s}$ の周期で滑走の判定を行う²¹⁾。滑走と判定された場合、増粘着材噴射用電磁弁に噴射指令（噴射信号）が出力される。また、車両の減速度 β_1, β_2 および速度差 ΔV の情報は常時 PC に伝送され記録される。滑走判定のためのしきい値の設定や判定周期等の入力は、PC で行えるようにした。

6.4 滑走制御ユニット

6.4.1 滑走制御ユニットの構成

滑走制御ユニットは、滑走検知ユニットから出力された噴射指令によって増粘着材の噴射を行うと共に噴射状態を検出する装置であり、増粘着材噴射装置と噴射状態検出装置で構成される。

6.4.2 噴射状態検出装置

増粘着材噴射による滑走防止では、滑走を検知した時点で確実に増粘着材を噴射しなければならない。そのため、増粘着材の噴射状態を把握する必要がある。噴射状態の検出には、粒子の接触帯電による電荷の移動を電流として検出する手法^{22), 23)}を用いた。噴射状態検出装置の測定原理や詳細構造は、2 章と同様である。

これまでに行われてきた多数の現車試験の結果から、車輪とレールの間の粘着力が低下した湿潤条件下において編成の先頭車両の第 1 軸で増粘着材の噴射を行うと、編成車両の先頭部から最後尾まで編成全体の車輪とレールの間の粘着力を向上させることが可能であることが示されている。よって、増粘着材噴射は、先頭車両の第 1 軸のみに行うものとする。先頭台車第 1 軸および第 2 軸の軸速度、減速度、速度差の変化量をそれぞれ観測し、滑走した車輪が再粘着するかどうかを確認することにより本システムの滑走防止効果を検証する。

現車によるブレーキ試験は、JR 信越本線（越後石山～東三条間 36.0 km）において、在来線特急形車両（6 両編成）および近郊形車両（8 両編成）を用いて実施した。ブレーキ試験は、乾燥条件あるいは湿潤条件において常用または非常ブレーキを用いて行った。乾燥条件では、約 100 km/h の速度からブレーキを作動させて車両が停止するまで行った。湿潤条件では、乾燥条件と同様に約 110 km/h あるいは約 120 km/h の速度からブレーキを作動させた。ブレーキを作動させる約 4.0 km 手前の地点から車両が停止するまで散水を行った。散水は、先頭第 1 軸の直前に取り付けた散水ノズルから第 1 軸前方のレール頭頂部に向けて行った。散水量は $6.7 \times 10^{-2} \text{ l/s}$ とした³⁾。滑走状態を判定する滑走検知ユニットのしきい値は、減速度のしきい値を $1.9 \text{ m/s}^2, 2.2 \text{ m/s}^2$ 、速度差のしきい値を 3.0 km/h, 5.0 km/h, 10.0 km/h と変えて実施した。

6.5 鉄道車両での噴射検出機能と滑走防止効果の検証

6.5.1 特急形車両での測定結果

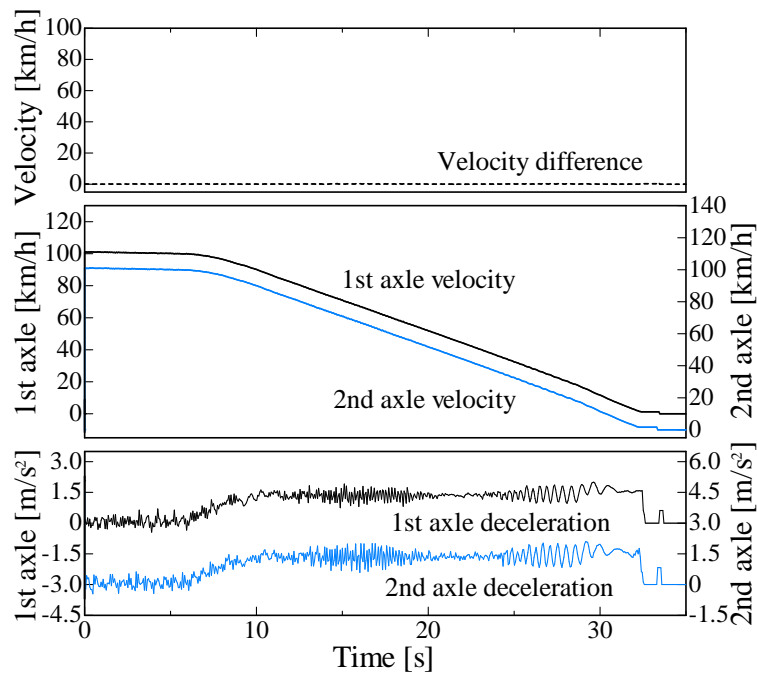
本システムの滑走防止効果を検証するために、特急形車両において常用ブレーキを用いてブレーキ試験を行った。試験は、乾燥条件（試番 1）、湿潤条件で本システム未使用（試番 2）、湿潤条件で本システム使用（試番 3）の 3 条件を行った。試験結果を Fig. 6.4 に示す。

Fig. 6.4 (a) は、試番 1 の結果である。上から順に、速度差 ΔV 、第 1 軸と第 2 軸の軸速度、第 1 軸と第 2 軸の減速度を表す。軸速度の図は見やすいように、第 1 軸と第 2 軸の目盛りをずらして表示した（以下の図も同様）。車両走行速度 100 km/h でブレーキを作動させた。ブレーキ動作開始後、第 1 軸と第 2 軸の軸速度は共に直線的に低下し、車両は滑走することなく停止した。

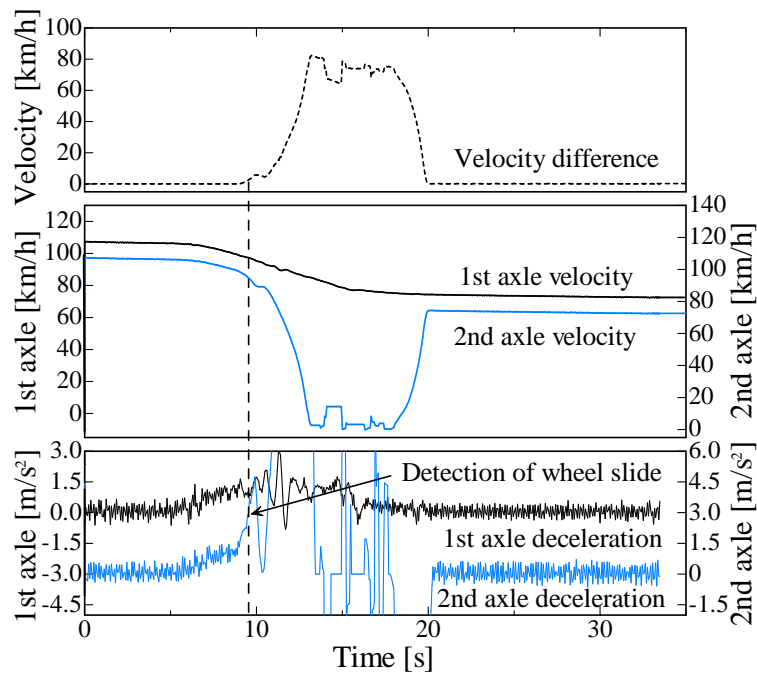
この試番では乾燥条件でのブレーキ試験のため、車輪とレールの間の粘着力は十分確保されており、車輪は滑走しなかった。

Fig. 6.4 (b) は、試番 2 の結果である。車両走行速度 106 km/h でブレーキを作動させた。ブレーキ作動後、第 1 軸、第 2 軸ともに軸速度（車両速度）は低下した。その後、第 2 軸で滑走が発生して急激に軸速度が低下し、第 1 軸が速度 95 km/h のときに第 2 軸の軸速度がほぼゼロの状態になって固着した。第 2 軸の車輪の固着状態が 5 s 間続いた後、軸速度が急激に上昇した。この軸速度の上昇は、固着による滑走の発生を回避するために、運転士がブレーキ力を意図的に解除したことによるものである。これにより低下した車輪とレールの間の粘着力は再び回復し、固着した車輪はレールと再粘着して再び回転を始めた。

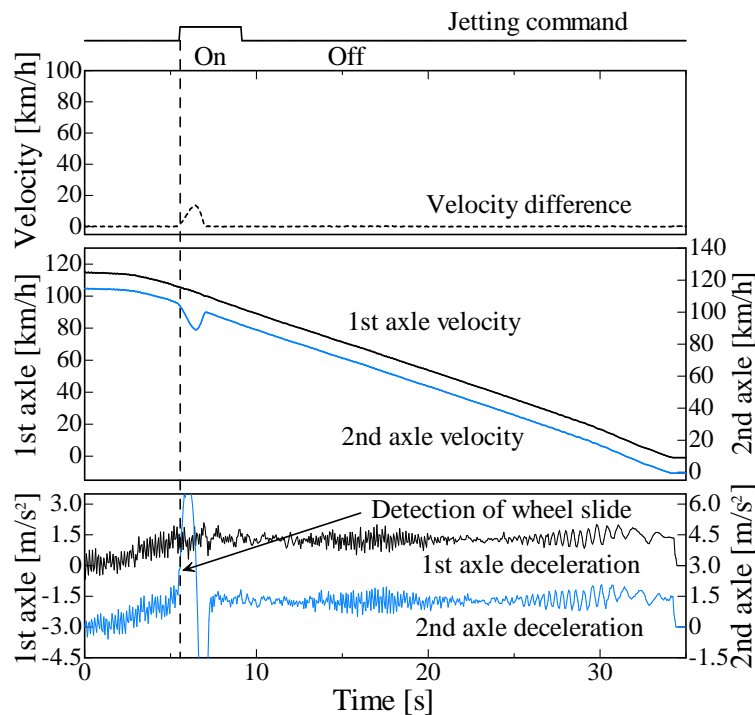
Fig. 6.4 (c) は、試番 3 で減速度のしきい値を 2.2 m/s^2 、速度差のしきい値を 3.0 km/h としたときの結果である。車両走行速度 118 km/h でブレーキを作動させた。第 1 軸の軸速度は車両が停止するまで滑走することなく直線的に低下した。一方、第 2 軸の軸速度はブレーキを作動させてから車両が停止するまでの間に前の試番と同様に滑走が発生した。この試番では、減速度と速度差による方法を併用して滑走検知を行ったが、滑走発生直後に測定していた第 2 軸の減速度 β_2 が設定した減速度のしきい値を超えたため、減速度から滑走と判定して増粘着材を噴射する制御を行った。その結果、車輪とレールの間の粘着力が回復し滑走した車輪は再びレールと再粘着して、一旦低下した軸速度は直ぐに上昇した。



(a) Proposed system is not used (dry condition)



(b) Proposed system is not used (wet condition)



(c) Proposed system is used (wet condition)

Fig. 6.4 Effect of using wheel slide detection and control system on limited express

その後、第 1 軸、第 2 軸は共に滑走することなく速度が下がり車両は停止した。

試番 3 (Fig. 6.4 (c)) では、滑走検知ユニットで滑走を検知して増粘着材の噴射を行ったため、試番 2 (Fig. 6.4 (b)) のように車輪は固着しなかった。このことから、本システムの増粘着材噴射による滑走防止効果が確認できた。この試番 3 では、減速度のしきい値 1.9 m/s^2 でも試験を行った。その結果、 1.9 m/s^2 においても滑走検知が可能であった。次に、減速度検知と速度差検知について滑走開始から滑走を検知するまでの時間を比較した。その結果、測定した速度差がしきい値 3.0 km/h を超えたのは、減速度のしきい値が 2.2 m/s^2 のときに滑走を検知してから 0.15 s 後、 5.0 km/h と 10.0 km/h ではそれぞれ 0.25 s 後と 0.5 s 後であった。減速度検知と速度差検知において検知する時間は最小で 0.15 s の差であったが、滑走を判定する滑走検知ユニットの測定周期が $25 \times 10^{-3} \text{ s}$ で検知する時間の差 0.15 s に比べて測定周期が早いことから滑走を十分に検知できるものと考えられる。

上記の試験では、減速度と速度差による滑走検知を併用して行い、減速度の方が速度差による検知に比べて早く滑走を検知する結果を得た。そのため、本システ

ムの滑走検知の方法としては減速度検知が有効である。減速度のしきい値は、値が小さいほど滑走の検知に敏感となるため、減速度のしきい値を小さくすれば増粘着材の噴射の開始がより早く行われるので、車輪が固着する可能性を低減できる。しかし、試験車両での非常ブレーキ時の減速度は 1.25 m/s^2 であり、この値に対して十分な余裕を取らないと、ブレーキ中に滑走していないにも関わらず誤検知により増粘着材が噴射されることになる。

本システムを使用する場合には、このような誤検知を回避しなければならない。車両での常用あるいは非常ブレーキ時の減速度に比べて、滑走検知ユニットで設定するしきい値は可能な限り大きい値にすることが望ましい。これらの結果から、実車試験における減速度のしきい値は、 1.9 m/s^2 よりも 2.2 m/s^2 が適切であると考えられる。

以上の現車試験の結果から、本システムは滑走防止に有効であることを確認した。

6.5.2 近郊形車両での測定結果

6.1 節の特急形車両において減速度のしきい値として適切と考えられる 2.2 m/s^2 を用いて常用および非常ブレーキによるブレーキ試験を行い、湿潤条件下において滑走防止効果を検証した。近郊形車両において試験を行った結果を Fig. 6.5 に示す。同図には、本システムの噴射状態検出装置を用いた増粘着材の噴射状態の検出結果も合わせて示した。

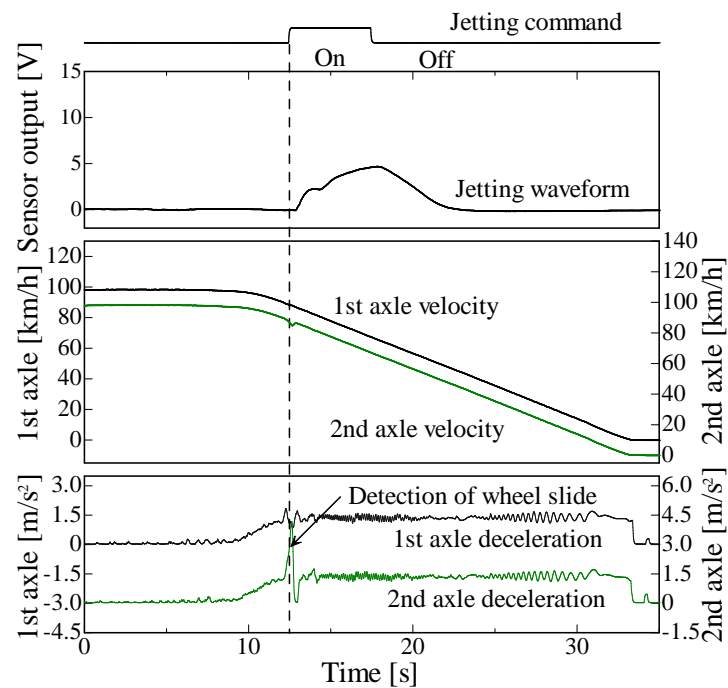
Fig. 6.5 (a) は、常用ブレーキを用いたときの結果である。車両走行速度 95 km/h でブレーキを作動させた。ブレーキ作動後、第 2 軸で滑走が発生したため、軸速度が急激に低下した。その結果、第 2 軸の減速度 β_2 が、設定した第 2 軸のしきい値の減速度を超えたため、滑走検知ユニットが滑走を検知し、増粘着材を噴射した。このとき、噴射指令により増粘着材噴射用の電磁弁が 5.0 s 間動作した。

Fig. 6.5 (a) の最上図に示すセンサーの電圧波形を見ると、噴射指令開始後に噴射が実行されたことを示すセンサーの電圧波形が現れている。

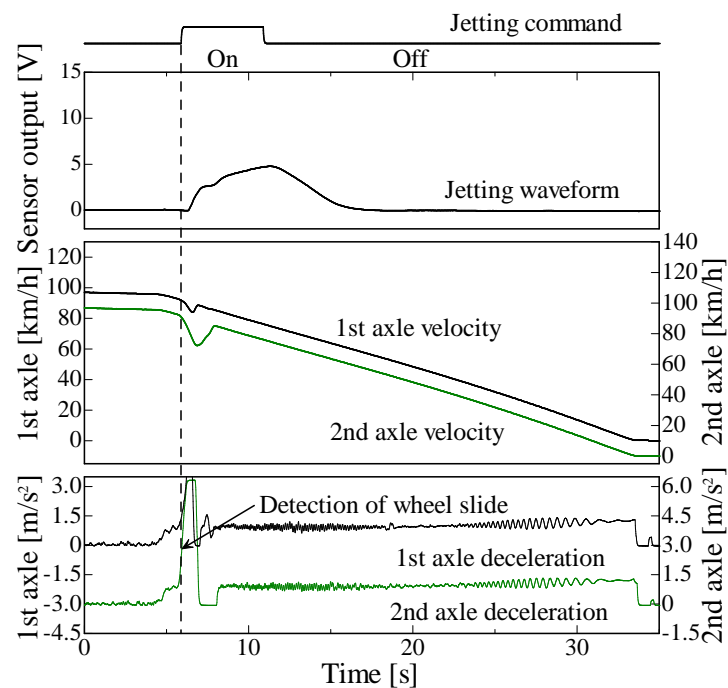
このセンサーで検出した電圧波形によって、増粘着材がセラジェットタンクから確実に噴射されていることが確認できる。滑走の発生により、第 2 軸の軸速度は一旦低下したものの、増粘着材を噴射したことにより車輪とレールの間の粘着力は再び回復し、車輪は滑走状態からレールと再粘着して第 1 軸と共に軸速度が上昇した。それ以後、滑走することなく軸速度は下がり車両は停止した。

Fig. 6.5 (b) は、非常ブレーキを用いた際の結果である。この場合、第 1 軸と第 2 軸共に滑走が発生したが、滑走検知と同時に増粘着材を噴射することにより滑走を防止することができた。

これらの試験結果から、本システムは湿潤状態において常用ブレーキ時だけでなく、非常ブレーキ時においても滑走検知と共に増粘着材の噴射を行うことにより、滑走防止が可能であることが分かった。



(a) Wheel slide protection during normal braking



(b) Wheel slide protection during emergency braking

Fig. 6.5 Effect of using wheel slide detection and control system
on suburban train

6.5.3 複数回発生した滑走の検知

6.4.1 節と 6.4.2 節のブレーキ試験の結果では、試験中に発生した滑走の回数は 1 回のみであった。しかし、実際の営業車両では滑走が複数回発生することもある。そのため、複数回発生した滑走を防止することが可能かどうかを検証した。近郊形車両において湿潤条件で非常ブレーキを用いてブレーキ試験を行った結果を Fig. 6.6 に示す。滑走検知ユニットにおける滑走検知の条件は、6.2 節と同様である。走行速度 100 km/h でブレーキを作動させた。ブレーキを作動させてから停止するまでの間に滑走が 2 回発生した。この 2 回の滑走を両方とも検知して増粘着材の噴射を行うことにより、滑走を両方とも防止することができた。

このことから、走行車両でブレーキを作動させてから車両が停止するまでの間に滑走が複数回発生した場合でも、本システムは滑走防止が可能であることが分かった。

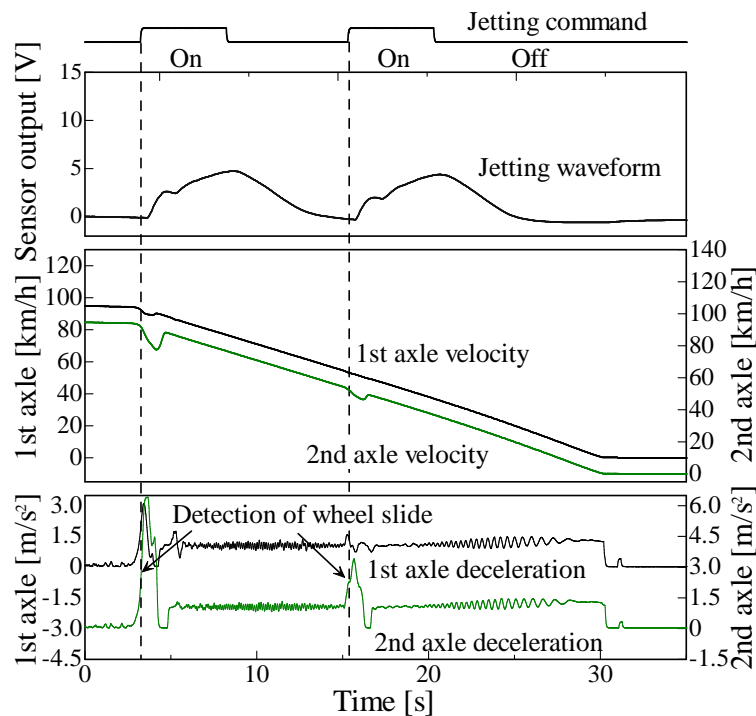


Fig. 6.6 Performances of using wheel slide detection and control system on suburban train

6.6 結言

本章では、鉄道車両におけるブレーキ時の滑走を自動で検知すると共に増粘着材を噴射することで滑走防止を行う、新たな滑走検知・制御システムを提案した。提案したシステムは、鉄道車両の滑走防止に用いられる ABS に比べて装置の構造が単純であることから、装置を小型・軽量化することができ、ABS を導入する場合に比べて導入費用が 1/10 程度に抑えることが可能である。そこで、ABS を装備していない鉄道車両で走行試験を行い、システムの滑走防止効果の有効性を確認した。

- 1) 営業車両に本システムを搭載し、湿潤条件下において現車試験を行った結果、本システムが滑走防止に有効であることを確認した。
- 2) 実験結果より、提案したシステムの滑走検知方法としては、速度差を用いるよりも減速を用いる方が迅速に検知できる。具体的には、減速度を用いることにより、滑走開始後 0.15 s 程度で検知でき、1.0 s で増粘着材を噴射し、2.0 s で滑走から回復できた。
- 3) ブレーキ中に複数回の滑走が発生した場合でも、滑走防止が可能である。
- 4) 常用ブレーキと非常ブレーキのどちらの場合においても、本システムは滑走防止に有効である。

記号

D	: wheel diameter	[m]
F	: pulse frequency number	[Hz]
P	: pulse	[—]
t	: time	[s]
Δt	: time difference	[s]
V	: vehicle velocity	[m/s]
ΔV	: velocity difference	[m/s]
$V(\Delta t + t)$: velocity difference	[s]
β_1	: deceleration of the first axle	[m/s ²]
β_2	: deceleration of the second axle	[m/s ²]

参考文献

- 1) Ohyama, T.; "Tribological Studies on Adhesion Phenomena Between Wheel and Rail at High Speeds," *Wear*, **144**, 263-275 (1991)
- 2) Uchida, S., A. Maruoka and T. Ohyama; "The Statical Method for Assuming the Distribution of Adhesion Coefficients from the Deceleration of Slipping Wheels on Shinkansen EMU," *RTRI Report, Japan*, **4**, 6, 1-7 (1990)
- 3) 運輸省鉄道局, 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 第 1 版, pp. 175-179, 研友社 (1993)
- 4) Armstrong-Helouvery, B., P. Dupont and C. C. Wit; "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction," *Automatica*, **30**, 7, 1083-1138 (1994)
- 5) Hasegawa, I. and K. Kayashima; "Brake Technology for 140 Km/h Operation of Narrow-Gauge Lines," *RTRI Report, Japan*, **13**, 10, 35-40 (1999)
- 6) Nagase, K.; "An Investigation into the State of Adhesion between Rails and Wheels by Slipping Adhesion Test Truck," *Quarterly Report of RTRI*, **29**, 2, 80-85 (1988)
- 7) Kumagai, N., I. Hasegawa, K. Kawaguchi, H. Nakamura and K. Nagase; "Mechanisms of Wheel Flat Occurrence," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, **57**, 2011-2016 (1991)
- 8) 望月旭, 杉島敏治, 池谷孝, 平林義章ほか, 鉄道車両技術の要点車両関係資格試験解答例, 第 2 版, pp. 35-51, 日本鉄道車両機械技術協会 (2000)
- 9) Nonaka, T., Y. Endo, T. Ohyama, H. Yoshikawa and S. Nakazawa; "Anti-lock Braking System for Railways," *Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics*, **18**, 813-820 (2006)
- 10) Park, S. H., J. S. Kim, J. Choi and H. Yamazaki; "Modeling and Control of Adhesion Force in Railway Rolling Stocks," *IEEE Control Systems Magazine*, 44-58 (2008)
- 11) Mei, T. X., J. H. Yu and D. A. Wilson; "A Mechatronic Approach for

- Anti-Slip Control in Railway Traction,” *The International Federation of Automatic Control, Proceedings of the 17th World Congress*, Seoul, Korea, July, 8275-8279 (2008)
- 12) 小澤明, 中島良浩, 電気車の科学 滑走検知装置の歴史と技術動向, 電気車研究舎, **44**, 4, pp. 23-29 (1991)
 - 13) Nakazawa, S. and A. Tsurusaki; ”Development of a New Skid Control Method Using a New Detection Algorithm,” *RTRI Report*, **25**, 1, 43-48 (2011)
 - 14) 大山忠夫, 粘着の話 車輪とレール間の粘着力とその有効利用, 第 1 版, pp. 36-46, レールアンドテック出版 (2002)
 - 15) Kumagai, N., T. Obara, I. Hasegawa, H. Yasuda and S. Uchida; ”Development of Brake Systems for Speedup on Shinkansen and Conventional Lines,” *Quarterly Report of RTRI*, **38**, 4, 200-205 (1997)
 - 16) Malvezzi, M., P. Presciani, B. Allotta and P. Toni; ”Probabilistic Analysis of Braking Performance in Railway,” *Journal of Rail and Rapid Transit, Part F: Proc. Instn MEch. Engrs.*, **217**, 149-165 (2003)
 - 17) Nankyo, M.; ”A Study fo Control Methods for the Braking System on Passenger Multiple Units,” *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2004-60776*, 1-6 (2004)
 - 18) 内田清五, 新幹線のブレーキシステム, 第 1 版, pp. 24-31, レールアンドテック出版 (2001)
 - 19) Yamazaki, H., T. Kamada and M. Nagai; ”Wheel Slip Prevention Control Based on Sliding Mode Control Theory for Railway Vehicles,” *Transactions of The Japan Fluid Power System Society*, **37**, 3, 36-42 (2006)
 - 20) Aburaya, K.; ”Anti-Slip and Slide Control by Voltage-Source Inverter,” *RTRI Report, Japan*, **4**, 7, 1-7 (1990)
 - 21) Hasegawa, I.; ”Brake Technology for 140 Km/h Operation of Narrow-Gauge Lines,” *RTRI Report, Japan*, **10**, 10, 35-40 (1999)
 - 22) Zhang, J., J. Coulthard, R. Cheng and R. Keech; ”Measuring Pulverised Fuel Using Electrostatic Meters,” *Proceedings of the 7th Inter-*

national Conference on Measurement and Control of Granular Materials, Shanghai, China, 3-7 (2006)

- 23) Matsusaka, S. and H. Masuda; "Electrostatics of particles," *Advanced Powder Technology*, **14**, 2, 143-166 (2003)

第 7 章

結論

7.1 本研究で得られた結果

本研究では、鉄道車両の車輪の滑走防止に用いられている既存の ABS とは異なるシステムとして増粘着材噴射装置を用いた滑走検知・制御システムを提案し、このシステムについて検証を行った。本博士論文は、ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの増粘着材噴射検出性能、振動特性および耐久性能の検証（第 2・3・4 章）と、実車試験によるセンサーの鉄道車両への適用性および滑走検知・制御システムの滑走防止効果の検証（第 5・6 章）に大別される。増粘着材を検出する静電気式粉体流量センサーの基本特性の検証ならびに鉄道車両の車輪の滑走を防止するために開発した同センサーを用いる滑走検知・制御システムの滑走防止効果を検証した結果が記されている。以下に、2 章～6 章で得られた主な成果を記す。

第 2 章「静電気式粉体流量センサーの粉体粒子の質量流量測定」では、鉄道車両において車輪とレールの間に増粘着材を噴射することで車輪の滑走を防止する増粘着材噴射装置について、増粘着材（セラミック粒子）が同装置から噴射されるとき噴射状態を検出する装置として静電気式粉体流量センサーを提案した。そして、ベンチ試験によりセンサーの増粘着材噴射検出性能を検証した。その結果、本センサーが増粘着材噴射の検出に有効であることを確認した。

1. インタラプトスティックを取り付けていない検出管では、輸送管を使用していない場合と鋼管を使用した場合においては、粉体粒子の流量を変えても数 10 mV 程度の検出電圧の値しか示さず、粉体流量と検出電圧との間には、相関関係が確認できなかった。一方、輸送管にゴムホースを使用した場合では、粉体流量の増加に伴い検出信号の値が増加する傾向を示した。
2. インタラプトスティックを数本取り付けた検出管は取り付けていないもの

に比べて、輸送管の有無に関わらず、高い検出感度を示した。

3. 本センサーでは粉体流量が 0.2~0.7 g/s の流量変化を検出可能で、静電容量測定よりも一桁小さいオーダーの流量変化を検出できる。
4. 輸送管に鋼管あるいはゴムホースを使用すると、検出信号はそれぞれマイナスとプラスの異なる極性を示した。
5. 検出管の形状は同一で、材質が異なると、検出信号の検出感度が異なることが確認できた。
6. インタラプトスティックを 4 本取り付けた検出管では、粉体粒子の流量と検出信号との間に、相関関係が確認でき、粉体粒子の流量を定量的に測定できることが確認できた。
7. それぞれの検出管について 100 回以上の噴射試験を繰り返し行ってきたが、検出感度が低下するような経時変化はなかった。

第 3 章「ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの振動特性評価」では、振動条件下で増粘着材を噴射したときの静電気式粉体流量センサーの検出性能を検証するために、加振機によるベンチ試験を行った。その結果、本センサーが振動条件下においても増粘着材の噴射を検出するのに有効であることを確認した。

1. 加振条件下においても、流量測定による検出電圧の噴射波形は、加振しない場合と同様に安定した波形であった。
2. 本センサーは、固有振動数で加振させても共振現象の影響を受けず、安定して測定ができる。
3. センサーを加振した場合、検出電圧は加振条件である加速度振幅および変位振幅によって影響を受けることを確認した。加振時の振幅が 0.005 mm 以下の場合には振動の影響を受けないことが明らかになった。
4. 加速度振幅や振幅が増加すると検出信号が大きくなる。これは、輸送管や検出管が振動することにより、それぞれの管の内壁と衝突する粉体粒子の数が増加するためであると推測される。
5. 本センサーは、増粘着材の流れを監視するモニタリング装置として振動条件の有無に関わらず有効である。
6. 本センサーは、JIS E 4031 に基づく振動耐久試験の基準を満たしており、鉄道用車両部品としての耐振動性を有している。

第 4 章「ベンチ試験による静電気式粉体流量センサーの耐久性・信頼性評価」では、静電気式粉体流量センサーを長期間使用したときの噴射検出性能を検証するために増粘着材噴射を繰り返し行う耐久性試験を実施した。そして、本センサーが長期耐久性および信頼性を有していることを確認した。

1. 検出管およびアイソレータの試験初期と積算噴射量が 15 年相当量とのときの表面粗さの差は約 $1\sim 2\mu\text{m}$ と小さく、20 年相当量とのときの質量の減量が総質量に対して約 0.38 % 以下、単位表面積当たりでは約 0.19 mg/mm^2 以下であることから、増粘着材のアブレシブ摩耗による検出管とアイソレータへの影響は少ないと考えられる。
2. 増粘着材噴射前と積算噴射量が 15 年相当量とのときの検出管およびアイソレータについて表面観察と粗さ測定を行ったが、表面状態に顕著な変化は見られなかった。
3. センサーの検出感度とインタラプトスティックの直径の大きさは相関関係があり、材質がステンレス (SUS304) 製のものはアブレシブ摩耗に対してほとんど摩耗することがなく有効である。
4. センサーの噴射検出性能は、積算噴射量が 15 年相当量まで増粘着材噴射を行っても増粘着材噴射を行っていないときと同等で噴射検出性能の低下はほとんど認められない。
5. センサーの耐摩耗性と噴射検出性能を検証した結果、本センサーは 20 年相当までの長期に渡る使用が可能であり、検出管とアイソレータにおいて増粘着材による摩耗が少ないことから、管厚を薄くすることによりセンサーの小型軽量化が可能である。

第 5 章「静電気式粉体流量センサーの鉄道車両への適用」では、振動条件下での静電気式流量センサーの増粘着材を噴射したときの噴射検出性能を検証するために鉄道車両にセンサーを搭載して走行試験を行った。その結果、センサーは走行する鉄道車両において振動の影響を受けても増粘着材噴射の検出が可能であり、実車両での使用が可能であることを確認した。

1. スノーブラウに固定したセンサーが走行時に受ける振動加速度の最大値は $36\text{ m/s}^2\sim 112\text{ m/s}^2$ 、その実効値 (RMS) は $1.3\text{ m/s}^2\sim 5.2\text{ m/s}^2$ であった。車両の走行速度 (振動条件) が異なる場合においても、上述した程度の振動加速度であれば、センサーで測定した信号波形は再現性があり、噴射を安定

して検出できる。また、この信号波形は車両停車時（無振動時）とほとんど同じである。

2. 本センサーによる増粘着材噴射時に観測される信号波形は、センサーの設置場所や配管形状の影響を受ける。輸送管の長さが異なるものを比較すると、輸送管が長いものの方が短いものに比べて検出信号が大きくなった。しかしながら、どの設置場所でも噴射の検出は可能であり、モニタリングシステムを構成する装置として実用化が可能である。

第 6 章「滑走検知・制御システムによる滑走防止効果の検証」では、走行する鉄道車両のブレーキ時に発生する車輪の滑走を防止するために、滑走を自動で検知すると共に増粘着材の噴射を行うことが可能な滑走検知・制御システムを提案した。そして、鉄道車両で滑走が発生したときの滑走検知・制御システムの滑走防止効果の有効性を検証するために、ABS が装備されていない鉄道車両に同システムを搭載してブレーキ試験を行った。

1. 営業車両に本システムを搭載し、湿潤条件下において現車試験を行った結果、本システムが滑走防止に有効であることを確認した。
2. 実験結果より、提案したシステムの滑走検知方法としては、速度差を用いるよりも減速を用いる方が迅速に検知できる。具体的には、減速度を用いることにより、滑走開始後 0.15s 程度で検知でき、1.0s で増粘着材を噴射し、2.0s で滑走から回復できた。
3. ブレーキ中に複数回の滑走が発生した場合でも、滑走防止が可能である。
4. 常用ブレーキと非常ブレーキのどちらの場合においても、本システムは滑走防止に有効である。

以上の研究成果を活用することにより、ABS を装備していない鉄道車両においても滑走防止が可能となり、購入コストの軽減することができ ABS よりも装置を小型軽量化できるため車両への設置場所の確保することも容易になる。さらに、鉄道車両の滑走に伴う車輪やレールの損傷の軽減、また損傷した車輪やレールの研削作業に掛かるコスト、作業の削減が可能となる。また、営業線での車両の遅延を減少させることにより、正確な時間での鉄道輸送が可能になることが期待される。

7.2 今後の課題

提案したシステムについては、実車両での検証、改良について今後も継続して行く予定である。本研究において、提案した滑走検知・制御システムは鉄道車両の車輪の滑走防止に有効であり、増粘着材が噴射されたかどうかを判定することが可能であることを検証した。今後検証すべき課題は、本システムで増粘着材の噴射がされなかったと判定されたときに行うプロセスである。現行のシステムでは、先頭車両第1台車の左右に増粘着材噴射タンクが1台ずつそれぞれ取り付けられており、このタンクから噴射される増粘着材の噴射状態をセンサーで検出しているだけである。そのため、増粘着材が噴射されなかった場合には噴射されなかった判定についてのみの情報が得られるが、増粘着材が噴射されないで車輪の滑走を防止することができない。現在の構想では、上記のタンクとは別に補助の増粘着材噴射タンクをそれぞれ1台ずつ設けて、センサーで増粘着材の噴射がされなかった場合には、その補助タンクから増粘着材を噴射させるようなシステムを設計し、検証することを考案している。

噴射指令開始から増粘着材噴射が実行されるまでの噴射開始時間は、実車の空気配管の長さや電磁弁の設置箇所により影響を受ける。また、増粘着材噴射による信号波形の形状も影響を受ける。そのため、空気配管の長さあるいは電磁弁の設置箇所と、噴射開始時間や信号波形との相関関係を検証することは重要である。これにより、提案するシステムを様々な車両へ適用した場合でも、最適な状態で使用できることが期待される。

このようなシステムを構築することにより、本システムを新幹線のような高速車両に適応した場合においても有効に活用できると考えられる。

7.3 他分野への適用

本論文の静電気式粉体流量センサーは、増粘着材噴射装置で使用する増粘着材（アルミナ粒子）だけではなく、その他の異なる材質の粉体粒子の管内固気二相流の流量計測が可能である。既往の静電容量などによる粉体流量の測定方法では流量 $2.0\text{ g/s} \sim 5.0\text{ g/s}$ が測定の限界である。しかし、本センサーは流量 $0.2\text{ g/s} \sim 1.0\text{ g/s}$ の範囲で測定可能であることから、粉体粒子の濃度が低い条件での流量計測に有効である。そのため、センサーは管路により粉体粒子を空気輸送する幅広い分野において活用できるものと期待される。

謝辞

本研究の遂行およびまとめにあたりご指導頂きました京都大学大学院工学研究科化学工学専攻の長谷部伸治教授，宮原稔教授，松坂修二教授に深く感謝申し上げます。

長谷部教授には，本学位論文の主査を賜り，入学してからの三年間と論文を仕上げるまで本研究について深く正確な知識に基づき，本研究を正しい方向へ導いて頂くと共に懇切丁寧なご指導を賜りましたことを心から感謝申し上げます。

宮原教授には，予備検討委員会において多くの貴重なご意見やご指導を頂いたことを心から感謝申し上げます。

松坂教授には，静電気帯電は元より粒子計測技術全般についてご指導して頂きましたこと，ならびに学会活動への参加を後押しして頂いたことを心から感謝申し上げます。

京都大学大学院の増田弘昭名誉教授には，学位論文の核である静電気帯電についての研究を開始した当初から多大なご協力とご教示を頂き，大学へ入学する前の査読付論文を二本書き上げるためにご協力を頂きました。また，著者が博士の学位を取得できるように京都大学大学院の博士後期課程へ入学する機会を与えて頂きましたことに深甚なる謝意を表します。

公益財団法人 鉄道総合技術研究所材料技術研究部の久保俊一部長，辻村太郎主管研究員には，研究の遂行ならびに大学院入学に関して深いご理解とご配慮を頂くとともに著者を学位取得へ導いて頂いたことに深く感謝申し上げます。

著者が所属する材料技術研究部摩擦材料研究室の柿嶋秀史室長には，ご助言やご協力を頂き深く感謝致します。

勤務先である鉄道総合技術研究所の方々には研究に専念できる環境に配慮して頂き，社会人として働きながら論文の執筆活動をさせて頂いたこと，ならびに博士の学位を取得させて頂いたことに深く感謝致します。

研究半ばで，予算の縮減などもあり研究テーマが中止になるかもしれない場面にも一時遭遇しましたが，鉄道総合技術研究所の熊谷則道専務理事の寛大なるご協力のお陰でこの状況を乗り越え，最後まで研究テーマを遂行することができたことに心から感謝申し上げます。

鉄道総合技術研究所の入社まもない時期から現在に至るまで研究業務だけに留まらず礼儀作法など公私に渡るまでご指導して頂いた坂本博副主任研究員には深甚なる感謝の意を表します。

車両構造技術研究部車両振動研究室の富岡隆弘室長には、学会発表についての有益な教唆と振動実験への多大なご支援ご協力を賜りましたことを厚くお礼申し上げます。

浮上式鉄道技術研究部電磁力応用研究室の鈴木江里光主任研究員には、著者の学会発表や論文の拙い英文原稿のチェックを快く引き受けて頂き深く感謝致します。

研究所の後輩の山下道寛主任研究員、伊藤幹爾主任研究員、鶴田浩二主任研究員には、実験棟や研究室の居室で激励の言葉を貰ったこと、実験設備をいつも快く提供してくれたことに感謝致します。

東京都市大学工学部機械工学科の井上靖雄客員教授には、職場の先輩として、また研究者として多くのご助言や叱咤激励を頂き厚くお礼申し上げます。

三協パイオテク株式会社の渡邊金之助代表取締役会長、時田実チーフには、多くの資料提供やご教示を賜りましたことを厚くお礼申し上げます。

元三協パイオテク株式会社の斉藤和男氏には、粒子の流量計測の研究を始める初期の段階での多大なるご助言やご協力を頂き感謝致します。

JR 東日本旅客鉄道株式会社新潟支社の社員の皆様方ならびに株式会社テスの大野薫部長には実車試験において多大なるご支援を頂きました。これらの方々には、厚くお礼申し上げます。

京都大学長谷部研究室の中西美子秘書には、博士課程在学中に事務手続きや先生方への連絡などご協力頂いたこと厚くお礼申し上げます。

長谷部研究室に在籍中の学生の皆さんにも多大なご支援・ご協力を頂いたこと感謝申し上げます。

筆者の一番の理解者である妻寿子のお蔭で、論文の執筆が煮詰まったときにも多いに勇気づけられ、精神的にも安定した状態で本論文を書き上げることが出来ました。

長男の千裕と二男の裕広には、励ましの声を沢山貰い大変力づけられました。

これらの方々のご理解、ご協力がなくては本学位論文の完成はありませんでした。

最後に、本学位論文を書き終えた喜びと共にこの謝辞に掲載することができなかったその他の諸先輩、後輩、友人、知人の方々に心より謝意を表します。

研究業績

発表論文

- 1) 具嶋和也, 坂本 博, 大野 薫, 時田 実, 齋藤和男, 増田弘昭, ”管内固気二相流における粉体粒子の質量流量測定,” 粉体工学会誌, **42**, 10, 708-714 (2005). [第 2 章に対応]
- 2) 具嶋和也, 富岡隆弘, 坂本 博, 大野 薫, 時田 実, 増田弘昭, ”振動条件下での静電気測定法による粉体粒子の流量測定,” 粉体工学会誌, **43**, 8, 559-566 (2006). [第 3 章に対応]
- 3) 具嶋和也, 松坂修二, 長谷部 伸治, ”静電気式粉体流量センサーの耐久性・信頼性に関する研究,” 日本機械学会論文集, A 編, **77**, 781, 1540-1553 (2011). [第 4 章に対応]
- 4) 具嶋和也, 富岡隆弘, 坂本 博, 時田 実, 渡邊 金之助, 松坂修二, 長谷部 伸治, ”静電気測定法による粉体流量センサーの鉄道車両への適用,” 日本機械学会論文集, C 編, **74**, 742, 1374-1380 (2008). [第 5 章に対応]
- 5) 具嶋和也, 坂本 博, 時田 実, 渡邊 金之助, 松坂修二, 長谷部 伸治, ”増粘着材噴射を用いた車輪の滑走検知・制御システム,” 日本機械学会論文集, C 編, **76**, 766, 1406-1412 (2010). [第 6 章に対応]

国際会議発表

K. Gushima, H. Sakamoto, M. Tokita, and H. Masuda, ”Monitoring of Ceramic Particle Flow by a Measuring Method of Static Electricity,” APVC 2007, 12 *th* Asia Pacific Vibration Conference, Hokkaido University, Sapporo, August 6-9 (2007)

国内学会発表

- 1) 具嶋和也, 伴 巧, 坂本 博, 大野 薫, 本多康祐, 時田 実, 齋藤和男, ”管内の固気二相流における粉体粒子の流量計測,” 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference, 長崎大学, Sep. 16-20 (2003).
- 2) 具嶋和也, 大野 薫, 時田 実, 齋藤和男, ”静電気による固気二相流における粉体粒子の流量測定,” 日本機械学会 山梨講演会, 山梨大学, Oct. 20 (2003).
- 3) 具嶋和也, 大野 薫, 時田 実, 齋藤和男, ”管内の固気固気二相流における粉体粒子の定量測定,” 粉体工学会, 秋季研究発表会, 千葉幕張メッセ国際会議場, Nov. 11-12 (2004).
- 4) 具嶋和也, 富岡隆弘, 坂本 博, 大野 薫, 時田 実, 増田弘昭, ”振動条件下での静電気による粉体粒子の流量測定,” 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference 2006, 名古屋大学, Aug. 6-9 (2006).
- 5) 具嶋和也, 富岡隆弘, 坂本 博, 大野 薫, 時田 実, 増田弘昭, ”静電気センサーを用いた増粘着材噴射のモニタリング,” 日本機械学会 第 15 回交通・物流部門大会, 川崎市産業振興会館, Dec. 13-15 (2006).
- 6) 具嶋和也, 坂本 博, 時田 実, 渡邊金之助, 松坂修二, 長谷部伸治, ”静電気式粉体流量センサーの鉄道車両への適用,” 粉体工学会 第 43 回技術討論会, アルカディア市ヶ谷, Jun. 10-11 (2008).